



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**PETTERI ORMISKANGAS**  
**BETONISANDWICH-ELEMENTIN KOSTEUSTEKNINEN**  
**TOIMINTA PAKSUILLA ERISTEILLÄ**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti,  
TkT Juha Vinha, DI Arto Suikka  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Rakennetun ympäristön  
tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 4. marraskuuta 2009

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**ORMISKANGAS, PETTERI:** Betonisandwich-elementin kosteustekninen

toiminta paksuilla eristeillä

Diplomityö, 127 sivua, 7 liitesivua

joulukuu 2009

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastajat: professori Matti Pentti, TkT Juha Vinha ja DI Arto Suikka

Avainsanat: Betonisandwich, kosteustekniikka, laskelmat

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia BSW-elementin kosteusteknistä toimintaa vuoden 2010 lämmöneristysmääräysten mukaisilla eristevahvuuksilla sekä verrata niitä aikaisemmin käytössä olleisiin. Työssä tutkittiin laskennallisesti pääasiassa rakennuskosteuden sekä rakennuksen käytön aiheuttamia rasituksia BSW-elementeille, joissa eristepaksuus ja tyyppi vaihtelivat, mutta esimerkiksi homeen kasvuun ei otettu kantaa. Rakenteiden käyttäytymistä eri ilmasto-olosuhteissa arvioitiin rakenneosien keskimääräisten kosteuksien, eri pisteiden suhteellisten kosteuksien sekä kosteusvirtojen avulla.

Teoriaosassa esitettiin lyhyesti BSW-elementin kosteus- ja lämpötekniiseen toimintaan liittyviä rakennusfysikaalisia perusteita sekä käsiteltiin rakenteelle aiheutuvia kosteusrasituksia. Laskelmaosuudessa esitettiin eri rakennetyypeille suoritettujen tietokonelaskelmien sekä niitä täydentävien käsilaskennan tulokset. Lämpö- ja kosteuslaskelmat tehtiin WUFI-ohjelmalla ja näiden tulosten perusteella tehtiin tuulettuvuusarviointia käsilaskennalla. Lisäksi todellisia virtausnopeuksia erilaisissa tasapainotilanteissa laskettiin Comsol Multiphysics ohjelmalla.

Tutkimuksen perusteella lämmöneristyspaksuuden kasvattaminen nykyisestä ei aiheuttanut suuria muutoksia BSW-elementin toimintaan. Suurempi vaikutus oli käytetyllä lämmöneristysmateriaalilla. Villaeristeisillä rakenteilla kosteuden poistuminen oli suoraviivaisempaa rakenteen ulko-osissa verrattuna EPS- ja uretaanieristeisiin, joilla alkutilanteeseen nähden joskus kosteuspitoisuudet jopa nousivat ensimmäisen vuoden aikana ennen kuin kääntyivät laskuun. Toisaalta EPS- ja uretaanieristeillä myös kosteuspitoisuudet olivat pienempiä ja muutokset hitaampia verrattuna villaeristeeseen. Kaikille rakenteille voimakas viistosade muodostui kriittiseksi tekijäksi ja se sekä hidasti selvästi rakennuskosteuden poistumista että piti ulkokuoren jatkuvasti kosteampana kuin tapauksissa, joissa viistosade oli vuodenaikana vähäisempää. Tuuletuksella ei todettu olevan EPS- ja uretaanieristeillä yhtä suurta vaikutusta rakenteen toimintaan kuin villaeristeillä.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

**ORMISKANGAS, PETTERI:** Moisture behaviour of concrete sandwich panels with thick insulation

Master of Science Thesis, 127 pages, 7 Appendix pages

December 2009

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Matti Pentti, D.Sc. Juha Vinha, M.Sc. Arto Suikka

Keywords: Concrete sandwich panel, moisture transport, calculations, humidity behaviour

The aim of this master's thesis was to investigate the humidity behaviour of concrete sandwich panels which meet the new requirements for insulation which take effect 2010 and compare them to structures used at the moment. In this thesis focus was to evaluate drying of building moisture and moisture stresses caused by building usage, and for instance risk of mold growth was ignored. Insulation material and thickness in sandwich panels were varied. Evaluation of structure behaviour in different climates was based on average water content in each layer, on relative humidity of specific points and moisture fluxes achieved from calculations.

The theoretical part of this study focused on the basis of thermal and moisture behaviour of concrete sandwich panels and ordinary moisture stresses were presented. Results of computer and supplementary hand calculations are presented in the practical part. Simultaneous heat, air and moisture (HAM) transport calculations were made with WUFI Pro 1D. Results of these calculations were supplemented with hand calculations in order to get estimates concerning effects of ventilation to sandwich panel humidity behaviour. In addition, velocity fields in ventilation channels at different circumstances were estimated with calculations done with Comsol Multiphysics program.

According to this study thicker insulation layer didn't cause severe difference to concrete sandwich panel's humidity behaviour. Type of used insulation material had greater influence on humidity behaviour than thickness of insulation. In structures where mineral wool was used as insulation drying process was more straightforward in outer parts of structure than in structures where expanded polystyrene or polyurethane were used. In some cases water content of outer panel did rise for couple of years before drying started usually at third year by latest. On the other hand EPS and polyurethane insulations caused outer panel to be dryer and changes in humidity and water content occurred slower. Severe wind driven rain was the most critical stress to all studied structures. It kept water content of outer panel high compared to cases where minor rain occurred and beyond that it also clearly slowed drying of initial building moisture. Ventilation effects in cases where EPS and polyurethane were used as insulation didn't cause as much drying as in structures using mineral wool.

## ALKUSANAT

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia uusien 2010 alusta voimaan tulevien lämmöneristysmääräysten mukaisten betonisandwich-rakenteiden kosteusteknistä toimintaa erilaisilla eristepaksuuksilla. Työ on tehty SBK-säätiön rahoittamana ja on osana BES-2010 projektissa. Tämä työ kirjoitettiin pääasiassa kesän 2009 aikana TTY:llä.

Lämmin kiitos kuuluu SBK-säätiölle työn taloudellisesta tukemisesta. Haluan kiittää myös Arto Suikkaa diplomityön aiheesta sekä työn ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää TTY:ltä professori Matti Penttiä ja TkT Juha Vinhaa työn tarkastuksesta ja ohjauksesta sekä muista kallisarvoisista neuvoista. Lisäksi yleinen kiitos TTY:n rakennustekniikan laitokselle työn käytännön osuuden tekemisen mahdollistavien puitteiden järjestämisestä. Haluan myös kiittää Comsol Oy:n Sakari Lukkarista Comsol ohjelman käytön opastuksesta.

Lisäksi lämmin kiitos vanhemmilleni saamastani tuesta ja kannustuksesta. Kiitos kuuluu myös lähipiirilleni, joka tuki ja auttoi työn teossa sekä kuunteli ymmärtäväisesti avautumiseni Excelin tarjoamista yllättävistä haasteista.

Seinäjoella 30. marraskuuta

Petteri Ormiskangas  
Vaaramentie 1 B 6  
605010 Hyllykallio  
040-5688647  
petteri.ormiskangas@gmail.com

# SISÄLLYS

Tiivistelmä.....	2
Abstract .....	3
Alkusanat.....	4
Termit ja niiden määritelmät .....	7
1. Johdanto.....	8
1.1. Yleistä .....	8
1.2. Tavoitteet .....	8
1.3. Tutkimusmenetelmät .....	9
2. Ulkoseinän teoreettinen tarkastelu .....	10
2.1. Lämmön siirtyminen ulkoseinissä.....	10
2.1.1. Lämmön johtuminen .....	10
2.1.2. Lämmön säteily.....	11
2.1.3. Lämmön konvektio .....	12
2.1.4. Betonisandwich-seinän U-arvon laskeminen .....	16
2.2. Kosteusrasitukset ulkoseinille .....	18
2.2.1. Sade .....	18
2.2.2. Ilman kosteus .....	19
2.2.3. Rakennuskosteus.....	20
2.2.4. Muut kosteuslähteet .....	21
2.2.5. Olosuhdetekijöiden vaikutus .....	21
2.3. Kosteuden sitoutuminen rakenteisiin .....	23
2.3.1. Tasapainokosteus .....	25
2.4. Kosteuden siirtyminen rakenteissa .....	27
2.4.1. Kapillaarinen siirtyminen .....	27
2.4.2. Vesihöyryn diffuusio.....	30
2.4.3. Vesihöyryn konvektio .....	33
2.5. Kosteuden tiivistyminen ja haihtuminen .....	35
2.5.1. Kosteuden kerääntyminen seinärakenteeseen .....	35
2.5.2. Seinärakenteen kuivuminen.....	38
2.5.3. Tuuletuksen vaikutus kuivumiseen.....	40
3. Kosteustekniset laskelmat .....	42
3.1. Laskentaohjelmista ja laskentaoletuksista .....	43
3.1.1. Laskentaolosuhteet.....	43
3.1.2. Käytetyt materiaaliarvot .....	46
3.1.3. Rakenteiden mallinnus ja käytetyt ohjelmat.....	47
3.1.4. Laskentaperiaatteet.....	48
3.2. Kosteusteknisten laskelmien tulokset.....	49
3.2.1. Rakennetyyppi US1 .....	49
3.2.2. Rakennetyyppi US2 .....	57
3.2.3. Rakennetyyppi US3 .....	63

3.2.4.	Rakennetyyppi US4 .....	68
3.2.5.	Rakennetyyppi US5a ja US5b .....	74
3.2.6.	Rakennetyyppi US6 .....	83
3.2.7.	Rakennetyyppi US7a ja US7b .....	90
3.2.8.	Rakennetyyppi US8 .....	99
3.2.9.	Rakennetyyppi US9 .....	106
3.2.10.	Sisäkuoren kosteuspitoisuuksista.....	112
3.2.11.	Virtausnopeuden arviointia tuuletusurassa.....	112
3.2.12.	Yhteenveto tuloksista .....	114
4.	Tulosten analysointi .....	119
4.1.	Yleistä.....	119
4.2.	Vesipitoisuudesta ja suhteellisesta kosteudesta .....	120
4.3.	Tuuletuksen vaikutuksesta .....	121
5.	Yhteenveto.....	123
	Lähteet.....	127
	Liite A – Rakennetyyppien periaate .....	128
	Liite B – Virtauslaskennan mallinnus.....	129
	Liite C – Tuuletuksen arviointia rakennetyypille US6 .....	133

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>BSW-elementti</b>	Rakennetyyppi, jossa lämmöneriste on asetettu kahden betonikuoren väliin. Tässä työssä ulkopuoleisen kuoren paksuus oli 70 mm ja sisäpuolisen 80 mm.
<b>EPS</b>	Eriste, joka on valmistettu paisutetusta polystyreenimuovista.
<b>Kosteuskapasiteetti</b>	Kosteuskapasiteetilla tarkoitetaan sitä vesimäärää, jonka materiaali pystyy sitomaan itseensä tietyllä ympäröivän ilman kosteudella.
<b>Kosteusvirta</b>	Tarkoittaa tietyn pinnan tai tason lävitse aikayksikössä tapahtuvaa kosteudensiirtymistä. Tavallisesti yksikkönä on $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .
<b>Nollajulkisivu</b>	Nollajulkisivulla tarkoitetaan tässä yhteydessä rakennetta, jota tarkasteltaessa ei oteta huomioon viistosateen eikä auringon säteilyn vaikutuksia.
<b>PUR</b>	Eriste, joka on valmistettu polyuretaanista.
<b>RH</b>	Suhteellinen kosteus (Relative Humidity), ilmassa olevan vesihöyryn määrä suhteessa kyllästyskosteuteen.
<b>Tasapainokosteus</b>	Tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteusmäärää materiaalin huokosissa, jolloin materiaalinkosteuspitoisuus huokosissa on tasapainoissa ympäröivän ilman kosteuden kanssa.
<b>U-arvo</b>	Rakenteen lämmönläpäisykerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ), joka kuvaa jatkuvuustilassa rakenteen läpi kulkevaa lämpövirran tiheyttä yksikön suuruisen lämpötilaeron vallitessa rakenteen eripuolilla.

# 1. JOHDANTO

## 1.1. Yleistä

Tämän työn tarkoituksena on tutkia vuonna 2010 voimaan tulevat lämmöneristemääräykset täyttävien betonisandwich-elementtien kosteusteknistä toimintaa laskennallisesti. Työ toimii samalla teoreettisena esiselvityksenä Saarijärvelle rakennettavan luonnonvaraininstituutin koehallin rakenteiden käyttäytymisestä. Koehallin elementtien lämpö- ja kosteustekniset mittaukset tullaan tekemään Jyväskylän ammattikorkeakoulun toimesta hallin valmistuttua. Työ on tehty SBK säätiölle TTY:n avustamana. TTY osallistui työn ohjaukseen ja tarkastukseen sekä tarjosi puitteet varsinaisten laskelmien tekoon.

Työssä esitellään lyhyesti laskelmien ymmärtämisen kannalta oleellinen teoreettinen tausta rakenteen kosteusteknisestä käyttäytymisestä. Varsinaisilla laskelmilla tutkitaan betonisandwich-rakenteen käytönaikaista kosteus käyttäytymistä erilaisilla eristeillä ja eristevahvuuksilla sekä rakennuskosteuden poistumista. Tutkittavat eristeet rakenteissa ovat uritettu mineraalivilla, urittamaton EPS, uritettu EPS sekä urittamaton polyuretaani. Tarkemmin rakennetyyppien periaate on esitetty liitteessä A.

Satunnaisten ja vaikeasti arvioitavissa olevia kosteusrasituksia, kuten putkivuodot ja vesivahingot, käsitellään hyvin rajoitetusti tämän työn puitteissa. Rakennuskosteuden määrää on vaikea arvioida ja sen määrä saattaa vaihdella huomattavasti eri kohdissa rakennetta. Rakennuskosteuden poistuminen on kuitenkin merkittävin kosteusrasitus ensimmäisen vuoden aikana rakenteelle.

## 1.2. Tavoitteet

Eristepaksuuksien kasvaessa myös BSW-elementin kosteustekninen käyttäytyminen muuttuu ulkokuoren pysyessä entistä kylmempänä. Tarkoituksena on selvittää laskennallisesti, kuinka eristepaksuuden kasvattaminen vaikuttaa kosteuden poistumiseen rakenteesta ja mahdolliseen kerääntymiseen rakenteessa talvikausien aikana. Lisäksi tarkastellaan rakenteen kuivumista ja kuivumispotentiaalia kesäisin. Mahdolliseen homeenkasvuun ei tässä työssä oteta kantaa. Kosteus käyttäytymistä pyritään selvittämään eri rakenneosien keskimääräisten kosteuspitoisuuksien, suhteellisen kosteuden sekä eri rajapintojen läpi menevien kosteusvirtojen avulla. Rakenteen ilmansuuntaa sekä ilmastoa vaihdellaan sääolosuhteiden merkityksen arvioimiseksi.

Tarkastelu olosuhteina käytetään laskentaohjelmista sopivaksi todettuja olosuhteita. Kaikkia todellisia rasituksia ei kuitenkaan voida laskennassa huomioida ”tarkasti”



hankalan ennustettavuuden ja suuren hajonnan vuoksi. Esimerkiksi elementtien alkuperäinen kosteuspitoisuus siinä vaiheessa, kun elementit on asennettu ja yläpohja saatu vesitiiviiksi voi vaihdella huomattavasti riippuen kuinka hyvin asennusaikainen ja työn aikainen sääsuojaus on onnistunut. Rakennuskosteus on kuitenkin oleellinen kosteusrasitus ja sen vuoksi sille käytetään mitoitukseen soveltuvaa tyypillistä arvoa.

Tarkasteltavissa BSW-elementeissä on käytetty kolmea erityyppistä eristettä: mineraalivillaa, EPS:ää ja polyuretaania. Työssä tehdään laskennan tulosten perusteella vertailua erityyppisen eristeen vaikutuksista rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Lisäksi pyritään selvittämään tuuletusurien tarpeellisuus EPS- ja uretaanieristeillä. Tuuletusurien pois jääminen palavilla EPS- ja uretaanieristeillä mahdollistaisi sen, ettei aukkoja tarvitsisi suojata palamattomalla materiaalilla, kuten palovillalla. Tuulettamattomien rakenteiden tapauksissa yritetään laskentaohjelmien rajoissa arvioida, ehtiikö syksyllä mahdollisesti runsaasta viistosateesta kastuva ulkokuori kuivua seuraavan kevään ja kesän aikana sekä tutkia, aiheuttaako se mahdollisesti ongelmia eristetilassa.

### **1.3. Tutkimusmenetelmät**

Varsinainen laskenta työssä tullaan tekemään ATK-ohjelmilla. Ohjelmista WUFI:a käytetään pääohjelmana, sen tarjotessa hyvät mahdollisuudet säärasitusten huomioimiselle ulkoseinille. Tuulettuvien rakenteiden tarkastelussa tehdään lisäksi aputarkasteluja COMSOL Multiphysics ohjelmistolla, joita täydennetään käsilaskennalla. Saatuja tuloksia verrataan aikaisempiin vastaaviin tuloksiin ja laskentamallien toimivuus tarkastetaan toimiviksi tiedetyillä rakenteilla

## 2. ULKOSEINÄN TEOREETTINEN TARKASTELU

Rakenteen kosteustekninen toiminta riippuu monesta tekijästä, kuten lämpö- ja kosteusvirroista, ympäröivistä olosuhteista sekä rakenteen materiaaleista. Tässä luvussa käsitellään ulkoseinien näkökulmasta kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat oleelliset kosteusrasitukset sekä ulkoseinän lämpö- ja kosteustekninen toimintaa teorian tasolla.

### 2.1. Lämmön siirtyminen ulkoseinissä

Lämpö on atomien tai molekyylien värähtelyliikettä. Lämpöä voi syntyä monella eri tavalla, esimerkiksi kitka tuottaa lämpöä, samoin sähkövastuksen läpi kulkeva virta. Myös jotkin kemialliset reaktiot voivat tuottaa lämpöä, esimerkiksi betonin kovettuminen.

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan lämpöenergian välittymistä eri lämpötiloissa olevien kappaleiden välillä. Tämä siirtyminen tapahtuu aina suuremmasta lämpötilasta pienempään lämpötilaan. Lämmön siirtyminen voi tapahtua johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla.

#### 2.1.1. Lämmön johtuminen

Lämmönjohtumisessa lämpöenergia siirtyy molekyylistä toiseen materiaalin sisäisen värähtelyn vaikutuksesta ilman, että molekyylien paikat vaihtuisivat. Lämpöenergia johtuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpötilaeron lisäksi johtumiseen vaikuttaa myös materiaalin lämmönjohtavuus. Johtumalla homogeenisessä ja isotrooppisessa ainekerroksessa siirtyvä lämpövirran tiheys  $q$  ( $\text{W/m}^2$ ) voidaan laskea Fourierin lain avulla. /Vinha; Hagentoft, s.15/

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

$\lambda$  = lämmönjohtavuus ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )

$T$  = lämpötila ( $\text{K}$ )

$x, y, z$  = lämpövirran suuntakoordinaatit

Kerroksiselle rakenteelle voidaan vastaavasti laskea materiaalin lämpötila tietyssä kohtaa rakennetta käyttämällä hyväksi materiaalien lämmönvastuksia  $R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) /Vinha/

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K/W}) \quad (2)$$

$$R_{tot} = R_{si} + R_l + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3)$$

$$T_x = T_i - \frac{\sum_{n=i}^x R_n}{R_{tot}} (T_i - T_e) \quad (4)$$

Yhtälö (4) pätee stationäärisessä tilassa. Mikäli tilanne on epästationaarinen, lämpötilojen ja lämpövirran tiheyden määrittäminen tapahtuu energiataseyhtälöllä. Yhtälössä varastoitu energia on yhtä suuri kuin tarkasteltavaan pisteeseen tulevan ja siitä lähtevän lämpövirran erotus lisättynä lämpökehityksellä tai lämpöhäviöllä. Johtumiselle energiataseyhtälö voidaan esittää muodossa /Vinha/

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' \quad (5)$$

$\rho$  = materiaalin tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )

$t$  = aika (s)

$q'$  = lämmönkehitys/lämpöhäviö ( $\text{W/m}^3$ )

### 2.1.2. Lämmön säteily

Säteilyllä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Säteilyä syntyy atomeissa ja molekyyileissä olevien elektronien paikkojen muuttuessa. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen lähettävät eli emittoivat lämpösäteilyä. Säteily ei vaadi konvektion ja johtumisen tavoin väliainetta edetäkseen, vaan väliaine saattaa jopa hidastaa säteilyn etenemistä pinnasta toiseen. Voimakkaimmin säteilyä emittoi ns. musta kappale, jonka lähettämä kokonaissäteily  $E_b$  (tai  $Q_m$ ) saadaan yhtälöstä /Vinha; Björkholz, s12/

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4 \quad (6)$$

$\sigma$  = Stefan – Boltzmannin vakio  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$T_s$  = kappaleen lämpötila (K)

Lämpösäteily on sitä lyhyempää, mitä kuumempi säteilevä pinta on. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa lämpösäteily voidaan jakaa lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltoista säteilyä on suora auringonsäteily sekä ilmakehästä ja pilvistä heijastuva diffuusi säteily, joka syntyy auringon säteilyn heijastuessa hiukkasista ja molekyyleistä tasaisesti eri suuntiin. Pitkäaaltoista säteilyä heijastuu diffuusina myös maanpinnalta ja rakennuksista. Todelliset pinnat kuitenkin emittoivat säteilyä mustaa kappaletta heikommin, ja tämä säteily voidaan laskea emissiviteetin  $\epsilon$  avulla /Vinha; Hagentoft, s.46-51/

$$E_b = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (7)$$

Pinnan emissiviteetti on aina välillä 0-1. Todellisuudessa emissiviteetti riippuu säteilyn aallonpituudesta, mutta rakennusfysiikassa pintoja voidaan käsitellä harmaina pintoina, jolloin säteily emittoituu tasaisesti joka suuntaan eikä emissiviteetti riipu säteilyn aallonpituudesta. Rakennusmateriaalit säteilevät pitkäaaltoista säteilyä, jolloin

myös emissiviteetti on yleensä suuri. Taulukossa 2.1 on esitetty joidenkin materiaalin emissiviteettejä. /Vinha, Hagentoft, s. 51/

**Taulukko 2.1** Joidenkin materiaalien emissiviteettejä /Björkholz, s. 12/

Materiaali	e
Alumiini	
kirkas	0,09
oksidoitunut	0,20-0,33
Betoni, karkea	0,94
Huurre	0,985
Lasi	0,94
Poltettu tiili	0,91-0,93
Kalkkiehkekatiili	0,9

### 2.1.3. Lämmön konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy virtaavan nesteen tai kaasun mukana. Konvektio voi johtua joko ulkoisten voimien vaikutuksesta tai lämpötilaeroista aiheutuvien tiheyserojen vaikutuksesta. Ulkoisten voimien aiheuttama eli pakotettu konvektio voi johtua esimerkiksi tuulesta, ilmanvaihdesta tai pumpusta. Lämpötilaerojen aiheuttama konvektio kutsutaan yleisesti luonnolliseksi konvektioksi. Puhtaasti luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin. Lämmönsiirrossa konvektiota käsitellään makroskooppisen aineensiirron eli advektion ja virtaavassa aineessa tapahtuvan molekyylien diffuusion summana. Pienillä virtausnopeuksilla lämmönsiirto on pääasiassa diffuusiota, ja virtausnopeuden kasvaessa advektion osuus kasvaa. /Vinha; Björkholz, s. 13/

Konvektion lämmönsiirto pinnasta ilmaan riippuu pinnan geometriasta sekä karheudesta, virtauksen luonteesta sekä virtaavan aineen virtausominaisuuksista ja termodynaamisista ominaisuuksista. Konvektiivisen lämpövirran tiheys  $q_{conv}$  ( $W/m^2$ ) saadaan Newtonin lain avulla, jossa edellä mainittuja konvektioon vaikuttavia seikkoja kuvataan konvektiivisella lämmön siirtokertoimella. /Vinha/

$$q_{conv} = \alpha_{conv} (T_s - T_a) \quad (8)$$

$$\alpha_{conv} = \text{konvektiivnen lämmönsiirtokerroin (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$T_s = \text{materiaalin pintalämpötila (K)}$$

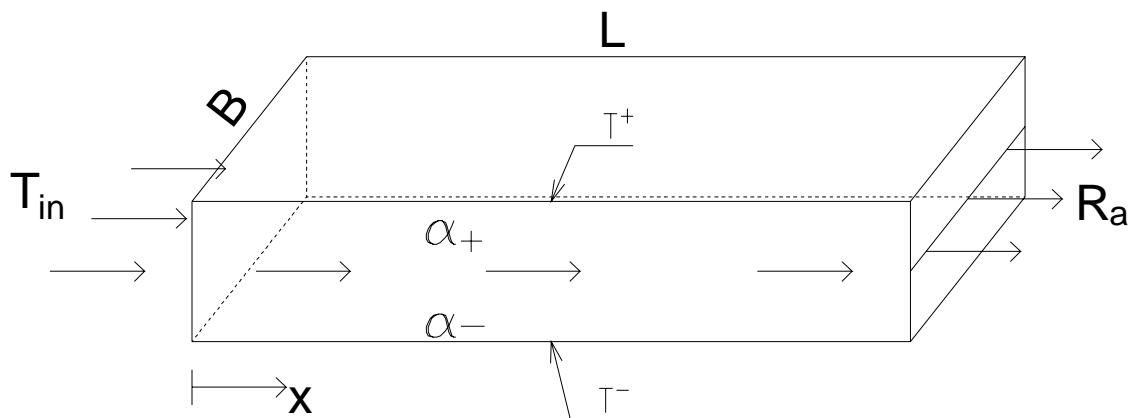
$$T_a = \text{ympäröivän ilman lämpötila (K)}$$

#### 2.1.3.1 Konvektio ilmapälissä

Hyvin tuuletetuissa ilmapälissä konvektion vaikutus on niin suuri, että ilmapälin ja sen ulkopuolella olevien rakennekerrosten lämmönvastus on hyvin pieni. Lievästi tuulettuvallakin ilmapälillä lämmönvastus voi olla puolet mitä vastaavan tuulettumattoman ilmapälin. Seinärakennetta voidaan pitää lievästi tuulettuvana, kun ulkoilmaan rajoittuvien aukkojen pinta-ala on  $5...15 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Suljetussa ilmapälissä ilman liike tapahtuu luonnollisen konvektion vaikutuksesta, eli ilman liike syntyy lämpötilaeroista aiheutuvista tiheyseroista. Avoimessa ilmapälissä ilman liike voi

tapahtua luonnollisen konvektion lisäksi myös esimerkiksi tuulesta aiheutuvien paineerojen vuoksi. /Vinha/

Lähteessä /Salonvaara/ on tutkittu tuuletusvälin vaikutusta betonirakenteilla. Tutkittavana oli rakenne, jossa sisäkuori oli 80 mm paksu, eristys 160 mm mineraalivillaa, 30 mm tuuletusrako ja betoninen 70 mm:n ulkokuori. Tutkimuksessa todettiin, että tuuletus ei heikennä rakenteen lämpötekniistä toimintaa merkittävästi. Tuuletusraoilla rakenteella aiheutui talvikaudella lämpöhäviötä noin 3 % verrattuna tuulettumattomaan rakenteeseen, kun tuuletusuran ilmavirtaus on alle 0,2 m/s. Kesäkaudella lämpöhäviöt kasvoivat suhteellisesti enemmän tuuletusilmavirran vuoksi, johtuen ilmavirtauksen auringon säteilykuormaa jähdyttävästä vaikutuksesta. /Salonvaara & Nieminen, s.57/



**Kuva 2.1** Kuvassa on esitetty periaate kuva yhtälöihin 9 ja 10 liittyvästä tuuletusvälistä merkintöineen. Kuva perustuu lähteeseen /Vinha/.

Tuuletusvälissä (Kuva 2.1) ilma voi olla joko lämpimämpää tai kylmempää kuin ulkoilma. Ulkoilmaa lämpimämpää tuuletustilan ilma voi olla esimerkiksi auringon lämmittäessä ulkoilmaa. Vastaavasti ulkoilmaa kylmempää tuuletusraon ilma voi olla rakenteesta ulospäin säteilynä tapahtuvan lämmönsiirron (ns. vastasäteily) johdosta, joka johtuu ympäröivien rakenteiden ja erityisesti kirkkaan taivaan näkymisestä ympäröivää ilmaa kylmempänä. Vastasäteilyn merkitys on betonirakenteita huomattavampi ohutlevyrakenteilla. Näin ollen ulkoa tuleva ilmavirtaus voi joko jähdyttää tai lämmittää rakennetta. Ilmavirtauksen ollessa vakio tuuletusvälin lämpötilaa etäisyydellä  $x$  (m) voidaan laskea yhtälöllä: /Vinha; Leino, s. 31.-32/

$$T(x) = T_0 + (T_{in} - T_0) \cdot e^{-\frac{x}{l_c}} \quad (9)$$

$T_{in}$  = tuuletusväliin tulevan ilman lämpötila (K)

$T_0$  = tuuletusvälin keskimääräinen lämpötila kaukana ilmavirtauksen sisään tulokohdasta, tai kun tuuletusvälissä ei ole ilmavirtausta (K)

$l_c$  = karakteristinen pituus (m)

Tuuletusvälin keskimääräinen lämpötila ja karakteristinen pituus voidaan laskea kaavoilla /Vinha/

$$T_0 = \frac{\alpha_+ \cdot T^+ + \alpha_- \cdot T^-}{\alpha_+ + \alpha_-} \quad (10)$$

$\alpha_+$  = tuuletusvälin lämpimämmän pinnan lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_-$  = tuuletusvälin kylmemmän pinnan lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$T^+, T^-$  = tuuletusvälin lämpimämmän ja kylmemmän pinnan lämpötilat (K)

$$l_c = \frac{\rho_a c_{pa} R_a}{B \cdot (\alpha_+ + \alpha_-)} \quad (11)$$

$R_a$  = ilman tilavuusvirta tuuletusvälissä (m<sup>3</sup>/s)

$B$  = tuuletusraon leveys sivusuunnassa (m)

$\rho_a$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$c_{pa}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa (J/kg·K)

### 2.1.3.2 Konvektio tuuletusurassa

Tuuletusurissa virtaava ilma säätelee rakenteen kosteus- ja lämpötekniistä käyttäytymistä ja samalla nopeuttaa rakenteen kuivumista. Tuuletusurassa tapahtuvan konvektion analysointiin on esitetty lähteessä /Lehtinen et. al., s.20..24/ Karl Gertisin esittämä analyttinen menetelmä tuuletusurien lämpötekniseen analysointiin.

Gertis esittää uran seinämistä tuuletusilmaan siirtyvälle lämmölle yhtälöä

$$dq = \alpha \cdot (t_w - t_z) \cdot u \cdot dz \quad (12)$$

$\alpha$  = tuuletusuran pinnan lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$u$  = tuuletusuran piiri (m)

$t_w$  = tuuletusuran pinnan lämpötila (°C)

$t_z$  = ilman lämpötila tuuletusurassa (°C)

Ilmaraon suunnassa tämä lämpövirta aiheuttaa lämpötilan nousemista yhtälön (13) mukaisesti. /Lehtinen et. al./

$$dq = \dot{m} \cdot c_p \cdot dt_z \quad (13)$$

Massavirta pysyy vakiona, mutta ilman lämmitessä tapahtuu ilman laajenemista /Lehtinen et. al./

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (14)$$

Yhtälöistä 12..14 saadaan differentiaaliyhtälö tuuletusuran ilman lämpötilalle /Lehtinen et. al./

$$\frac{dt_z}{dz} = St \cdot \frac{u}{A} \cdot t_z - St \cdot \frac{u}{A} \cdot t_w = 0 \quad (15)$$

Kyseessä on lineaarinen ja homogeeninen yhtälö, jolle esitetään Gertisin ratkaisu lähteessä /Lehtinen et. al./. Tuuletusuraan tulevan ilman lämpötila tuloilma-aukon kohdalla on likimain sama kuin ulkoilman lämpötila. Tällöin saadaan yhtälölle 15 ratkaisuksi

$$t_z = t_w - (t_w - t_u) \cdot e^{-St \cdot \frac{u \cdot z}{A}} \quad (16)$$

$St$  = Stantonin luku

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{\alpha}{\rho_a \cdot v \cdot c_a}$$

Tuuletusuran lämpöteknisen käyttäytymisen kannalta tulee tietää ilman virtausnopeus tuuletusurassa sekä pinnan lämmönsiirtokerroin. Virtausnopeus riippuu vallitsevien ilmanpainesuhteiden lisäksi myös tuuletusuran geometriasta. Lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavat ilman virtausnopeuden lisäksi tuuletusuran pinnan muodot. Virtausnopeuden kannalta on merkittävää virtauksen laatu, onko kyseessä laminaarinen vai turbulenttinen virtaus. /Lehtinen et. al./

Yleensä lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen käytetään Nusseltin lukua, Prandtin lukua ja Reynoldsin lukua. Virtauksen ollessa laminaarista,  $Re < 2000$ , Nusseltin luku voidaan laskea kaavalla /Lehtinen et. al./

$$Nu = 2,7877 \cdot \left( \frac{z}{Re \cdot Pr \cdot d} \right)^{-0,254057} \quad (17)$$

$d$  = tuuletusuran hydraulinen halkaisija (m)

$Re$  = Reynoldsin luku

$Pr$  = Prandtin luku

Kaava 17 on likiarvokaava, jonka soveltuvuusalue on sulkulausekkeen arvon ollessa 0,0001...1. Jos Prandtin luvulle käytetään arvoa 0,72, saadaan kaava 17 muotoon

$$Nu = 2,7877 \cdot \left( \frac{1,38 \cdot z}{Re \cdot d} \right)^{-0,254057} \quad (18)$$

Nusseltin luvun sekä tuuletusuran avulla saadaan lämmönsiirtokertoimelle yhtälö (19) sekä likiarvolle yhtälö (20) /Lehtinen et. al., s. 22/

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d} = \frac{2,7887 \lambda \left( \frac{1,38 \cdot z \cdot \gamma_a}{v \cdot d^2} \right)^{-0,254057}}{d} \quad (19)$$

$$\alpha = 0,07562 d^{-1,0017} \quad (20)$$

$\gamma_a$  = ilman kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )

$v$  = ilman virtausnopeus (m/s)

Turbulenttisen virtauksen tapauksessa Nusseltin luku voidaan esittää seuraavalla likiarvokaavalla Prandtin luvun ollessa 0,72.

$$Nu = 2,22788 + 3,2 \cdot \left( \frac{Re}{1000} \right) - 0,01178 \left( \frac{Re}{1000} \right)^2 + 0,000012 \left( \frac{Re}{1000} \right)^3 \quad (21)$$

Soveltamalla kaavaa 19 saadaan lämmönsiirtokertoimelle yhtälö /Lehtinen et. al., s.22/

$$\alpha = \frac{2.2788\lambda + 3.2\lambda\left(\frac{v \cdot d}{1000\gamma_a}\right) - 0.01178\lambda\left(\frac{v \cdot d}{1000\gamma_a}\right)^2 + 0.000012\lambda\left(\frac{v \cdot d}{1000\gamma_a}\right)^3}{d} \quad (22)$$

Tuuletusurassa kulkevan ilman lämpötila voidaan laskea edellä esitettyjen kaavojen perusteella. Lähteessä /Lehtinen et. al., s. 23/ on tutkittu laskennallisesti virtausnopeuden vaikutusta urassa virtaavan ilman lämpenemiseen. Tuloksista käy ilmi, että tuuletusuran ollessa kylmää betonipintaa vasten, ei virtausnopeudella ole suurta vaikutusta lämpötilan nousuun urassa, kun auringon lämpösäteilyn vaikutus on pieni. /Lehtinen et. al./

#### 2.1.4. Betonisandwich-seinän U-arvon laskeminen

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa eri rakennusosille ilmoitetaan lämmöneristysvaatimukset U-arvon, eli lämmönläpäisykertoimen avulla. Uusissa vuoden 2010 alussa voimaan tulevissa lämmöneristysmääräyksissä, rakentamismääräyskokoelman osa C3, annetaan esimerkiksi ulkoseinälle lämmönläpäisykertoimelle arvo 0,17 W/m<sup>2</sup>K ja yläpohjalle 0,09 W/m<sup>2</sup>K. /RakMk C3/

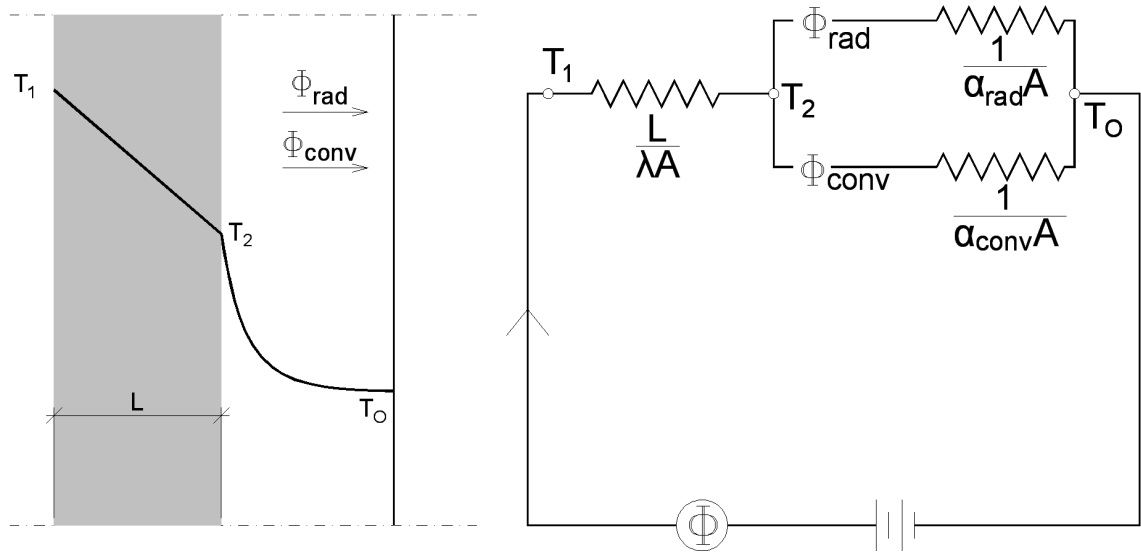
Rakenteen lämmönläpäisykerroin määritetään kokonaislämmönvastuksen käänteisarvona (yhtälö 3). Rakennusosien lämmönläpäisykertoimia määritettäessä tulee käyttää materiaalien lämmönjohtavuuden (ns.  $\lambda$ -arvo) suunnitteluarvoja. Usein rakenne koostuu kerroksista, jolloin joka kerroksella on oma lämmönjohtavuutensa. Lämmönjohtuminen on kuitenkin hyvin analoginen verrattuna sähkönjohtumiseen (ks. Taulukko 2.2.2), ja näin ollen myös rakenne voidaan kuvata vastaavasti ”lämmönvastuspiirinä.” /Vinha; Mills, s.24-26/

**Taulukko 2.2.2** Ohmin lain ja lämmön johtumisen välinen analogia. Perustuu lähteeseen /Vinha/

$I = \frac{U_1 - U_2}{R_e}$		$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_A}$	
I	Sähkövirta (A)	$\Phi$	Lämpövirta (W)
$U_1 - U_2$	Jännite-ero (V)	$T_1 - T_2$	Lämpötila-ero (K)
$R_e = \frac{L}{\sigma_e \cdot A}$	Sähkövastus ( $\Omega$ )	$R_A = \frac{L}{\lambda \cdot A}$	Lämmönjohtumisvastus $\left(\frac{K}{W}\right)$

Käyttämällä analogiaa ohmin laista voidaan kuvan (Kuva 2.2) seinärakenne esittää myös lämmönvastuspiirin muodossa. Kerroksista koostuvan materiaalin jokainen kerros voidaan esittää vastuksena. Mikäli kerroksessa tapahtuu lämpöhäviöitä vain yhdellä tavalla, voidaan kerros esittää sarjaan kytkettynä vastuksena. Vastaavasti, jos kerroksessa tapahtuu johtumista useammalla kuin yhdellä tavalla, voidaan tämä esittää rinnan kytkettyjen vastusten avulla. /Mills, s.24-26/





**Kuva 2.2** Seinärakenne, jossa aiheutuu lämpöhäviötä johtumalla, säteilemällä sekä konvektiolla ja sitä vastaava lämmönvastuspiiri. Perustuu lähteeseen /Mills, s. 25/

Tuulettumattomalle BSW-elementille U-arvo voidaan laskea lämmönvastuspiiri-ajattelua hyödyntäen sarjaan kytkettyjen vastusten avulla. Tuuletturallisissa BSW-elementeissä ei näin voida menetellä, sillä lämpövirran suunnassa on eriarvoisia materiaaleja tuuletturien kohdalla. Tuuletturissa lämpö siirtyy johtumalla, säteilemällä sekä ilman konvektiolla. Lievästi tuulettuvissa rakenteissa tuulettusraossa olevalle ilmalle voidaan käyttää lämmönvastuksena puolta tuulettumattoman ilmavälin arvosta. Esimerkiksi 20 mm tuuletturalle saadaan lämmönvastukseksi 0,085 m<sup>2</sup>K/W. /Salonvaara & Nieminen, s. 21/

U-arvon laskennassa suunnittelulämmönjohtavuutena käytetään kahden tiiviin pinnan väliin asetetun eristeen lämmönjohtavuutta. Varsinainen U-arvo saadaan ylä- ja alalikiarvon painotettuna keskiarvona. Ylälikiarvoa laskettaessa oletetaan, että lämpövirtausta tapahtuu vain x-suunnassa. Tällöin tarkasteltava rakenne jaetaan useampaan osaan siten, että jokainen eristekerros on tämän jälkeen tasa-aineinen. Ylälikiarvoa vastaava rakenteen kokonaislämmönvastus voidaan laskea kaavalla /Vinha; Salonvaara & Nieminen, liite A]/

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{Tn}} \quad (23)$$

$f_{a\dots n}$  = tasa-aineisia ainekerroksia sisältävän osa-alueen a, b,...n suhteellinen osuus rakenteen kokonaispinta-alasta,  $f_n = A_n/A_T$

$R_{Ta\dots n}$  = tasa-aineisia ainekerroksia sisältävän osa-alueen a, b,...n kokonaislämmönvastus  $R_{Tn} = R_{si} + R_{n1} + R_{n2} + \dots + R_{nn} + R_{se}$

Alalikiarvoa laskettaessa taas oletetaan, että lämpötila muuttuu vain x-suunnassa. Tällöin jokaiselle epätasa-aineiselle kerrokselle lasketaan ensin lämmönvastus pinta-alojen suhteessa. Tämän jälkeen rakenteen kokonaislämmönvastus lasketaan kohdan 2.1.1 mukaan, käyttäen epätasa-aineiselle kerrokselle pinta-alojen suhteessa laskettua

lämmönvastusta. Epätasa-aineisen kerroksen lämmönvastus voidaan laskea kaavalla /Vinha/

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_{aj}}{R_{aj}} + \frac{f_{bj}}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_{nj}}{R_{Tn}} \quad (24)$$

$f_{aj, \dots, nj}$  = epätasa-aineisessa ainekerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a_j, b_j, \dots, n_j$  suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta  $f_{nj} = A_{nj}/A_T$

$R_{nj}$  = epätasa-aineisessa ainekerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a_j, b_j, \dots, n_j$  lämmönvastus

Edellä esitettyä kaavaa voidaan käyttää, kun epätasa-aineisessa kerroksessa vierekkäisten aineiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot poikkeavat toisistaan vähemmän kuin viisinkertaisesti. Jos poikkeamaa on enemmän, käsitellään tämä aine kylmäsilta. Kylmäsilat, kuten BSW-elementin ansaat, huomioidaan lisäämällä ylä- ja alalikiarvo-menetelyjen keskiarvona saatuun U-arvoon tarvittavat lisäkonduktanssit. Esimerkiksi lähteessä /Salonvaara & Nieminen/ on laskettu ansaista aiheutuvan lisäys  $0,0111 \text{ W/m}^2\text{K}$  U-arvoon, kun ansaita on  $5,556 \text{ kpl/m}^2$ . Tarkemmin lisäkonduktanssien laskemista on käsitelty esim. standardissa SFS-EN ISO 10211-2 (2001) ja myös julkaisussa RIL 225-2004. Koko rakenteen U-arvo voidaan laskea yhtälöllä /Vinha; Salonvaara & Nieminen/

$$U = \frac{1}{R_T} + \sum \Delta U \quad (25)$$

$R_T$  = rakenteen kokonaislämmönvastus

$\Delta U$  = lisäkonduktanssit, kuten kylmäsilat yms.

## 2.2. Kosteusrasitukset ulkoseinille

Ulkoseinälle tavanomaisia kosteusrasituksia ovat vesi- ja lumisade, sisä- ja ulkoilman kosteus, rakennuskosteus, tilojen käytöstä aiheutuvat kosteusrasitukset sekä tiivistyvä kosteus. Lisäksi seinälle voi sijainnista riippuen tulla rasituksia maaperänkosteudesta, pohjavedestä, pintavesistä sekä olosuhteiden johdosta myös mahdollisista roiske- ja vuotovesistä.

Merkittävimmät kosteusrasitukset ulkoseinille ovat viistosade, sisäilman kosteus sekä rakennuskosteus. Kosteuslähteiden lisäksi ulkoseinän kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat olosuhdetekijät, joita ovat mm. tuuli, lämpötilat rakenteen eri puolilla, auringon säteily, painovoima sekä rakenteen yli vaikuttavat paine-erot.

### 2.2.1. Sade

Sade voi tulla vetenä, lumena tai jäänä. Merkittävin saderasitus ulkoseinälle on viistosade. Tuulen ja sateen vaikuttaessa samanaikaisesti sadepisarat putoavat vinosti ja tätä vaakasuoraa komponenttia kutsutaan viistosateeksi. Lähteen /Vinha/ mukaan viistosateen määrä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$W_{wdr} = 0,222 \cdot r \cdot W_h^{0,88} \quad (26)$$

$W_{wdr}$  = viistosade seinäpinnalle (mm/h·m<sup>2</sup>)

$W_h$  = sademäärä vaakapinnalle (mm/h·m<sup>2</sup>)

$r$  = tuulen nopeus (m/s)

Viistosateen määrä vaihtelee suuresti vuosittain ja vuodenaikojen mukaan. Syksyisin sademäärät ovat suurimmillaan. Sademääriin vaikuttaa myös ilmansuunta ja maantieteellinen sijainti. Lähteen /Metiäinen/ mukaan on vapaan viistosateen määrä karkeasti arvioiden 100-200 mm/m<sup>2</sup>/vuosi. Noin puolet tästä määrästä sataa syksyisin. Kuitenkin seinälle osuva viistosade on määrältään pienempi kuin vapaa viistosade.

Ulkopinnan muotoilu, saumarakenteet sekä pintamateriaalin vedenimukyky vaikuttavat seinälle osuvan viistosateen aikaansaamaan vesikalvoon sekä sen mahdolliseen imeytymiseen rakenteisiin. Seinän ulkopinnan ollessa tiivis, muodostuu siihen sateen alkuvaiheessa alaspäin valuva vesikalvo, joka pinnan karheudesta riippuen voi olla hyvin tasainen tai valua satunnaisesti uomia pitkin alas. Huokoisen ulkopinnan tapauksessa vesi imeytyy alkuun pintamateriaalin huokosverkostoon ja näin ollen vesikalvon syntyminen myöhästyy. Tiiviin ulkopinnan tapainen vesikalvo syntyy siinä vaiheessa kun seinän pinnalle tuleva vesimäärä ylittää materiaalin imunopeuden.

Käsittelemällä julkisivu vettä hylkivällä aineella voidaan vähentää sadeveden imeytymistä materiaaliin, mutta toisaalta se samalla hidastaa rakenteen kuivumista ulospäin. Oli rakenteen ulkopinnan pintakäsittely mikä tahansa edellä mainituista, vettä imeytyy kuitenkin rakenteeseen epäjatkuvuuskohdista. /Pentti ja Hyypyläinen, s. 15/

### 2.2.2. Ilman kosteus

Rakennetta ympäröivä ilmankosteus vaikuttaa rakenteen ja sen materiaalien tasapainokosteuteen. Ulkoseinän tapauksessa merkittävintä on seinän eripuolilla vallitsevien kosteusolosuhteiden ero. /Pentti ja Hyypyläinen, s. 17/

Rakennusteknisissä tarkasteluissa voidaan ilma olettaa ideaalikaasuksi, jolloin tietyssä paineessa ja lämpötilassa oleva kaasutilavuus sisältää aina yhtä monta molekyyliä. Vesimolekyylit ovat kevyempiä kuin ilmamolekyylit, jolloin ilma kevenee vesihöyrypitoisuuden kasvaessa. Jokainen erillinen ilmassa oleva kaasu vaikuttaa kokonaispaineeseen molekyylimäärän suhteessa ja jokaisella kaasulla on oma osapaine. Kokonaispaine on likimain näiden osapaineiden summa. Ilman ja vesihöyryn ominaisuudet riippuvat paineesta sekä lämpötilasta. Vakiopaineessa ilman tiheys pienenee lämpötilan kasvaessa. Ilman tilavuuden ollessa vakio lämpötilan kasvun myötä myös ilmanpaine kasvaa. Ilman vesihöyrypitoisuuden vaihtelusta aiheutuvat tiheyden vaihtelut ovat pieniä lämpötilasta aiheutuviin verrattuna. /Pentti ja Hyypyläinen, s. 17/

Ilman vesihöyrypitoisuudella tarkoitetaan vesihöyryn massaa jaettuna ilman tilavuudella. Tiettyssä lämpötilassa ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Ilmassa olevan vesihöyryn määrä ilmaistaan yleensä joko absoluuttisena kosteutena (kg/m<sup>3</sup>) tai suhteellisena kosteutena. Suhteellisella kosteudella (RH) tarkoitetaan tiettyssä lämpötilassa ilmassa olevan vesihöyryn määrää  $v$  (g/m<sup>3</sup>) suhteessa kyllästyskosteuteen  $v_{sat}$  (g/m<sup>3</sup>).

$$RH=v/v_{\text{sat}} \quad (27)$$

Niin ulko- kuin sisäilman kosteuteen vaikuttaa suuresti säätilojen ja vuodenaikojen vaihtelut. Ulkoseinän kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta tärkeimpiä ovat kuitenkin pidempien aikojen keskiarvot. Kosteuden sitoutuminen materiaaliin ja sitoutumisesta aiheutuvat vaikutukset tapahtuvat viiveellä, joten hetkellisillä ilman kosteuden vaihteluilla ei ole oleellista vaikutusta rakenteisiin.

Sisäilman kosteus on riippuvainen paitsi ulkoilman kosteudesta myös mm. huoneen tai huoneiston käyttötarkoituksesta, ilmanvaihdosta, käytöstä aiheutuvasta kosteuslisästä, rakenteen läpi poistuvasta kosteudesta, ympäröivien materiaalien kyvystä sitoa ja luovuttaa kosteutta. Lähde /Vinha/ esittää käytöstä aiheutuvan kosteuslisän laskemiseksi yhtälöä

$$\Delta v = \frac{G}{n \cdot V} \quad (28)$$

$G$  = kosteustuotto sisäilmaan (kg/h)

$n$  = ilmanvaihtokerroin (1/h)

$V$  = rakennuksen sisätilavuus (m<sup>3</sup>)

Yleensä mitoitettaessa oletetaan kosteuslisä vakioiksi. Asuintaloissa kosteuslisä vaihtelee yleensä 2...5 g/m<sup>3</sup> välillä ja hyvänä mitoitusarvona voidaan pitää 5 g/m<sup>3</sup>. Ilmanvaihdon vaikutus sisäilman kosteuslisään on huomattava. Runsaasti kosteutta tuottavien tilojen, kuten uima-allastilojen, märkätilojen, vettä prosesseissa käyttävien tilojen tapauksissa on syytä tehdä aina kosteusteknisiä erikoistarkasteluja. /Vinha; Pentti ja Hyypöläinen, s.22/

### 2.2.3. Rakennuskosteus

Rakennuskosteudella tarkoitetaan rakenteisiin valmistuksen, varastoinnin, kuljetuksen ja rakennustyön aikana päässyttä kosteutta. Rakennuskosteuden määrään vaikuttavat valmistustekniikan lisäksi rakenteiden varastoinnin, kuljetuksen ja erityisesti työnaikainen suojaus. Suurimmat rakennuskosteusmäärät ovat betoni- ja kevytbetonirakenteissa, muuratuissa rakenteissa sekä rappauksissa. Hydrauliset sideaineet (esim. sementti) sitovat osan valmistusvaiheen vedestä kemiallisesti, joka pienentää poistumaan pyrkivän kosteuden määrää. /Pentti ja Hyypöläinen, s. 23/

**Taulukko 2.3** Eräiden rakennusaineiden ja rakenteiden rakennuskosteuksia /Pentti ja Hyypöläinen, s.24; 4/

Aine tai rakenne	Rakennusvaiheen kosteus kg/m <sup>3</sup>	Aineeseen kemiallisesti sitoutuva kosteus kg/m <sup>3</sup>	Hygroσκοoppinen kosteus, kun ilman RH50 kg/m <sup>3</sup>	Poistuva kosteus kg/m <sup>3</sup>
Betoni	180	70	30	80
Karkaistu kevytbetoni	100...200	x	20	80...180
Kalkkilaasti	300	-30	10	320
Kalkkisementtilaasti	300	20	30	250
Tiili	10	x	10	0
Tiilimuuri	80	x	10	70
Puu	60	x	40	20

Taulukossa 2.3 on esitetty eräiden rakennusmateriaalien rakennuskosteuksia. On huomattava, että taulukossa annetut kosteudet ovat suuntaa-antavia; esimerkiksi betonilla kemiallisesti sitoutuvan kosteuden määrä kasvaa betonin lujuuden kasvaessa ja vastaavasti rakenteesta poistuva kosteus pienenee.

#### 2.2.4. Muut kosteuslähteet

Ulkoseinien kosteusteknisessä tarkastelussa huomioon otettavia poikkeuksellisia kosteusrasituksia ovat esimerkiksi putkivuodot ja vesieristeen vuodot. Pahimmat kosteusvauriot syntyvät useimmiten erilaisista vesivuodoista. Syntyvien vaurioiden tyyppiin, laajuuteen ja vakavuuteen vaikuttavat oleellisesti rakennetyyppien vaurioherkkyys poikkeuksellisille kosteusrasituksille sekä rakenteen kuivumiskyky. /Pentti ja Hyypöläinen/

#### 2.2.5. Olosuhdetekijöiden vaikutus

Varsinaisten kosteustekijöiden lisäksi rakenteen yli vaikuttavat ilmanpaine-erot vaikuttavat huomattavasti rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Ilmanpaine-erot aiheutuvat tuulen, lämpötilaerojen sekä koneellisen ilmanvaihdon ja rakennuksen tiiviyssuhteiden yhteisvaikutuksesta. Tuuli voi aiheuttaa taloon yli- tai alipainetta riippuen talon geometriasta, tuulen nopeudesta ja suunnasta. Tuulenpuoleisen seinän ollessa muita epätiivimpi, aiheuttaa tuuli taloon ylipainetta. Vastaavasti talon sisälle muodostuu alipaine, jos suurin osa aukoista on suojan puolella. /Pentti ja Hyypöläinen/

Ulko- ja sisäilman lämpötilaerosta johtuvaa ilmanpaine-eroa kutsutaan termiseksi konvektioksi tai savupiippuvaikutukseksi. Huoneilman lämmitessä sen tiheys pienenee ja se alkaa nousta ylöspäin. Näin huoneen yläosaan alkaa muodostua ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Ilmanpaine-eron suuntaan vaikuttaa, missä kohdin taloa epätiivieyskohdat sijaitsevat. /Pentti ja Hyypöläinen/

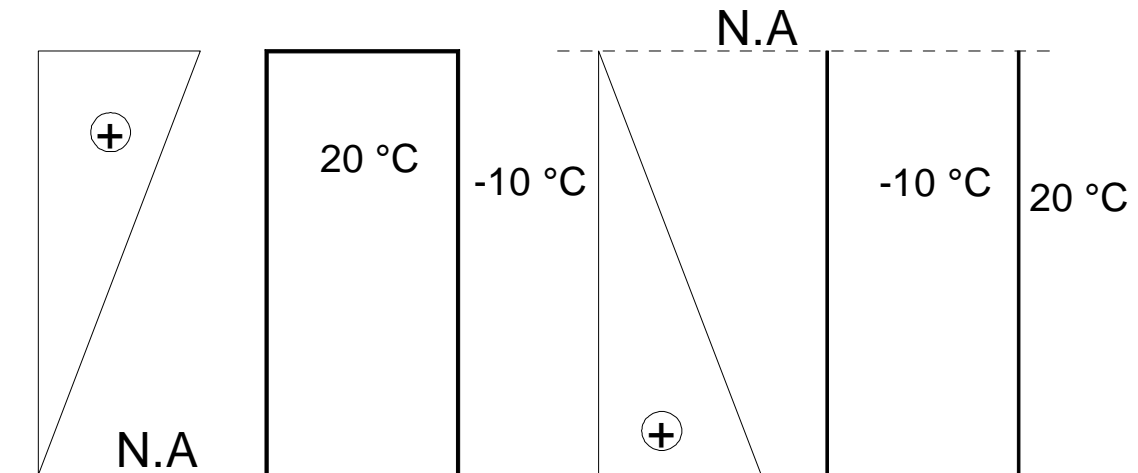
Ilman tiheys vaihtelee lämpötilan mukaan lämpimämmän ilman ollessa kevyempää. Ilmapatsaan korkeuden kasvaessa kasvaa myös lämpötilasta aiheutuva paine-ero siirrettäessä ilmapatsas eri lämpötilaan. Paine-eroa, joka aiheutuu sisä- ja ulkoilman

välisestä lämpötilasta  $Dh$  metriä korkeassa ilmapatsaassa voidaan arvioida yhtälöllä /Straube/

$$\Delta P = 3465 \cdot \Delta h \cdot \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right) \text{ [Pa]} \quad (29)$$

$T_s$  ja  $T_u$  = sisä- ja ulkolämpötilat (K)

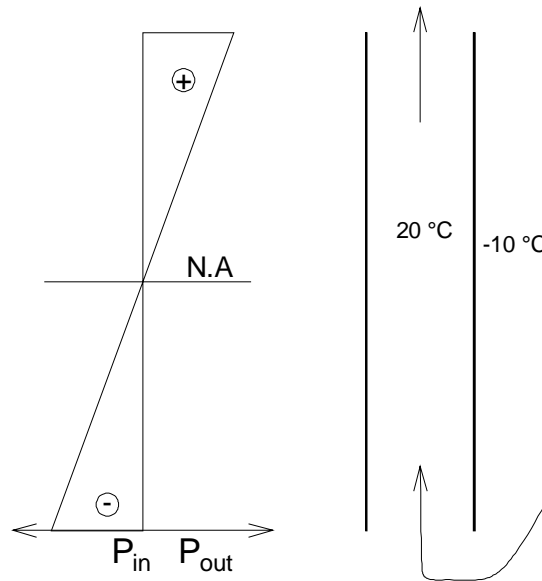
$Dh$  = ilmapatsaan korkeus (m)



**Kuva 2.3** Nosteesta aiheutuva paine-ero toisesta päästään avoimessa sylinterissä. [Straube]

Esimerkiksi metrin korkuinen alareunastaan avoin sylinteri on alun perin sisällä +20°C asteen lämpötilassa ja se viedään ulkoilmaan, jossa ympäröivän ilman lämpötila on -10°C, muodostuu sylinterin yläreunaan 1,34 Pa:n suuruinen ylipaine (Kuva 2.3). Putken alapäässä paine-ero on nolla, sillä se on yhteydessä ulkoilmaan. Tätä vaakasuoraa tasoa, jossa sylinterin sisällä ja ulkopuolella olevat paineet ovat yhtä suuret, kutsutaan neutraaliakseliksi (N.A.). Vastaavasti jos sylinteri jätetään ulkoilmaan, lämpötilat tasaantuvat ja paine-ero häviää. Jos tämän jälkeen sylinteri käännetään ylösalaisin ja tuodaan takaisin sisätilaan, muodostuu taas sylinterin suljettuun päähän 1,34 Pa:n suuruinen paine ulospäin, kun kylmempi ulkoilma syrjäyttää lämpimämmän sisäilman alas painuessaan. /Straube/

Edellisissä tapauksissa ei kuitenkaan tapahtunut ilmanvirtausta, sillä ilmavirtaukselle ei ollut reittiä. Jos toisesta päästään suljettu sylinteri korvataan avoimella sylinterillä, lämpötilaero sylinterissä olevan ja sitä ympäröivän ilman välillä aiheuttaisi ilmavirtauksen. Tällöin sylinterissä oleva lämpimämpi ilma korvautuisi nopeasti ympäröivällä kylmemmällä ilmalla. Jos sylinteriä kuitenkin lämmitetään siten, että ilma pysyisi 20 °C lämpötilassa sylinterin sisällä (Kuva 2.4), lämpiää sylinteriin sisälle tuleva ilma. Tämä tilanne on analoginen lämmitetyn rakennuksen kanssa. Kitka hidastaa ilmavirtausta ja aiheuttaa paineen alenemisen sylinterin matkalla. Tässä tapauksessa neutraaliakseli on sylinterin puolella välissä. /Straube/



**Kuva 2.4** Ilmavirtaus lämmitetyn sylinterin tai talon läpi. /Straube/

Rakennuksissa neutraaliakselin paikka voi vaihdella sen mukaan, missä rakennuksen epätiiveyskohdat sijaitsevat. Jos esimerkiksi seinät ovat tiiviimpiä kuin lattiat, käyttäytyy rakennus edellisessä kappaleessa kuvatus avoimen sylinterin tavoin. Mikäli yläpohja on harvempi kuin alapohja, nousee neutraaliakselin sijainti ja kääntäen yläpohjan ollessa tiiviimpi kuin alapohja neutraaliakselin sijainti laskee. /2:Pentti ja Hyypyläinen, s. 26; Straube/

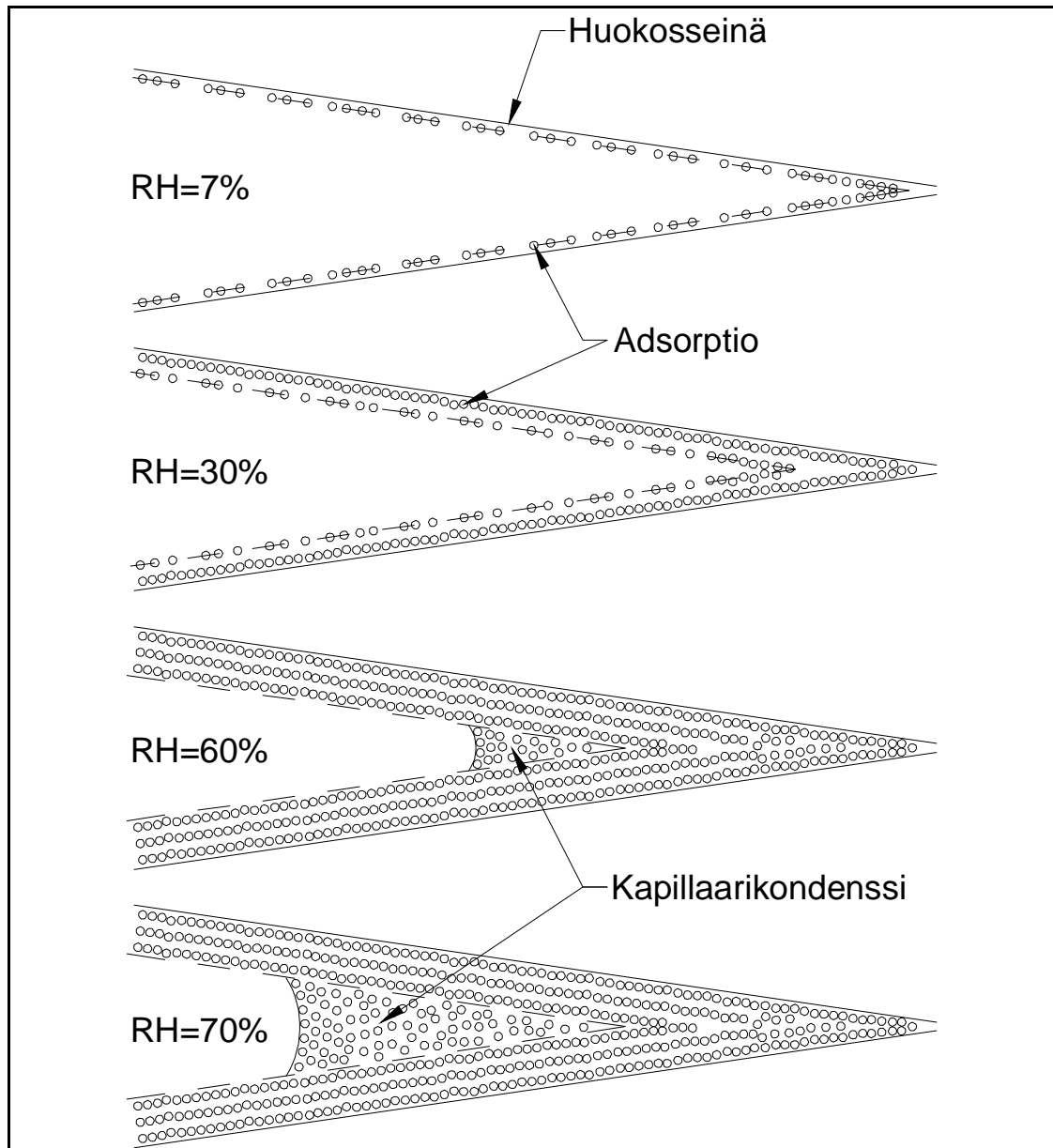
### 2.3. Kosteuden sitoutuminen rakenteisiin

Kosteutta imeytyy huokosiin materiaaleihin, kuten tiili, laasti, betoni ja puu, niiden ollessa yhteydessä veteen tai kosteutta sisältävään ilmaan. Sitoutuminen materiaaliin johtuu siitä, että materiaalissa on tyhjää huokostilaa, johon vesimolekyylit mahtuvat. Kertyvän kosteuden määrä ja kertymisnopeus riippuvat olosuhteiden lisäksi myös materiaalin huokosten muodosta, koosta, määrästä sekä huokosjärjestelmän ominaisuuksista, kuten jatkuvuus. /Pentti ja Hyypyläinen, s.27/

Materiaaliin voi kosteutta sitoutua kaasuna, nesteinä tai kiinteässä muodossa. Vesi voi olla sitoutuneena rakenteeseen kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi on rakenteessa ioni- tai molekyylisidoksessa ollen näin osa rakennetta. Heikommin rakenteeseen sitoutunutta vettä kutsutaan fysikaaliseksi vedeksi. Fysikaalisesti sitoutunutta vettä ovat adsorptiovesi ja kapillaarisesti sitoutunut vesi. Huokosilmassa on lisäksi vesihöyryä sekä suurissa raoissa tai onkaloissa mahdollisesti painovoimaisesti kulkeutunutta gravitaatiovettä. /Pentti ja Hyypyläinen, s.27/

Adsorptiovesi on vesimolekyylien kiinnittymistä huokosten pintaan van der Waalsin voimien välityksellä. Aluksi vesi kiinnittyy huokosten pintaan yksimolekyyllisenä kerroksena, mutta suhteellisen kosteuden kasvaessa myös kerrospaksuus huokosten seinämällä kasvaa. Kerrospaksuuden kasvaessa myös van der Waalsin voimat pienenevät ja vesi alkaa käyttäytyä vapaammin. Tällöin huokosissa syntyy

kapillaarikondensssia, joka täyttää ohuet ja kapeat huokososat pintajännityksen ja koheesion avulla jo suhteellisen kosteuden ollessa alle 100%. Pienet huokokset, joiden halkaisija on alle 0,1 mm täyttyvät jo adsorptiovedestä. Kaiken kaikkiaan sitoutuvan veden määrä riippuu eniten suhteellisesta kosteudesta, materiaalin huokosverkoston ominaispinta-alasta ( $\text{m}^2/\text{kg}$  tai  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) sekä aineen kemiallisesta luonteesta. Kuvassa (Kuva 2.5) on esitetty huokosten täyttymistä vähitellen adsorption ja kapillaarikondenssin vaikutuksesta. /Vinha; Pentti ja Hyypöläinen, s.27/



**Kuva 2.5** Kuvassa on esitetty huokosten täyttyminen adsorption ja kapillaarikondenssin vaikutuksesta suhteellisen kosteuden kasvaessa. /Pentti ja Hyypöläinen, s.28/

Kapillaarisesti vettä imeytyy materiaalin huokosverkostoon vapaasta vedenpinnasta kapillaarivoimien ajamana. Vesi imeytyy pieniin huokosiin suurella voimalla, mutta hitaasti ja vastaavasti suurempiin huokosiin nopeammin, mutta pienemmällä voimalla. Kapillaarisissa huokosissa, huokoskoko  $0,1 < d < 10 \text{ mm}$ , vesi liikkuu pääosin kapillaaristen voimien vaikutuksesta. Kapillaari huokosissa liike on aina suuremman



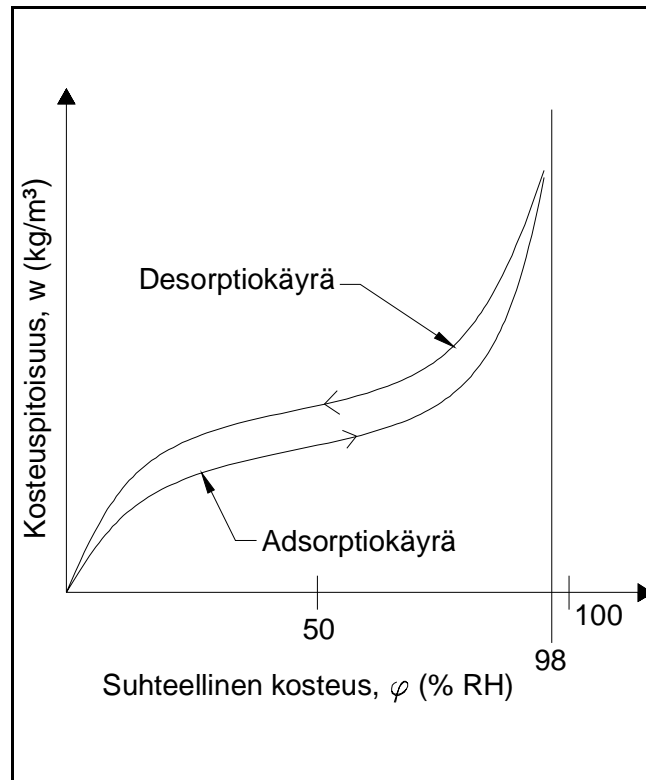
huokosalipaineen suuntaan. Tarkemmin kapillaarista veden siirtymistä käsitellään kohdassa 2.4.1/Vinha/

Rakenteen huokosissa vesihöyrynä oleva vesi ei ole varsinaisesti materiaaliin sitoutunutta, vaan se liikkuu materiaalin huokosissa olevien osapaine-erojen vaikutuksesta ilmatäytteisissä huokosissa. Huokosissa olevan vesihöyryn määrä on kuitenkin pieni verrattuna adsorptioveteen. Vesihöyryn määrä riippuu materiaalin suhteellisen kosteuden lisäksi myös lämpötilasta ja materiaalin huokoisuudesta. /Vinha; Pentti ja Hyypöläinen, s.27/

### **2.3.1. Tasapainokosteus**

Kosteustasapainolla tarkoitetaan sitä kosteuspitoisuutta, jonka materiaali saavuttaa asetettaessa se tiettyyn ympäristöön. Materiaaliin sitoutuvan kosteuden määrä riippuu siitä, onko materiaali yhteydessä kosteaan ilmaan vai veteen. Hygroskooppisuudeksi kutsutaan aineen kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta ilmaan. Hygroskooppisella tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteusmäärä, jonka aine kykenee sitomaan suoraan ilmasta. Tällöin materiaalin huokosissa olevan ilman suhteellinen kosteus on sama kuin ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Tämän kosteusmäärän suuruus riippuu materiaalin lisäksi suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta sekä siitä, onko materiaali kuivumassa vai kostumassa. Tasapainokosteuden eroa kuivumisen ja kostumisen välillä kutsutaan hystereesiksi. Lähteen /Vinha/ mukaan hygroskooppisen alueen ylärajaksi on määritetty 98 % RH, koska koeolosuhteissa ei käytännössä päästä korkeammalle. Kuvassa (Kuva 2.6) on esitetty periaatteellinen hygroskooppisen alueen tasapainokosteuskäyrä. /Pentti ja Hyypöläinen, s.28-29; Björkholz, s.59-60/

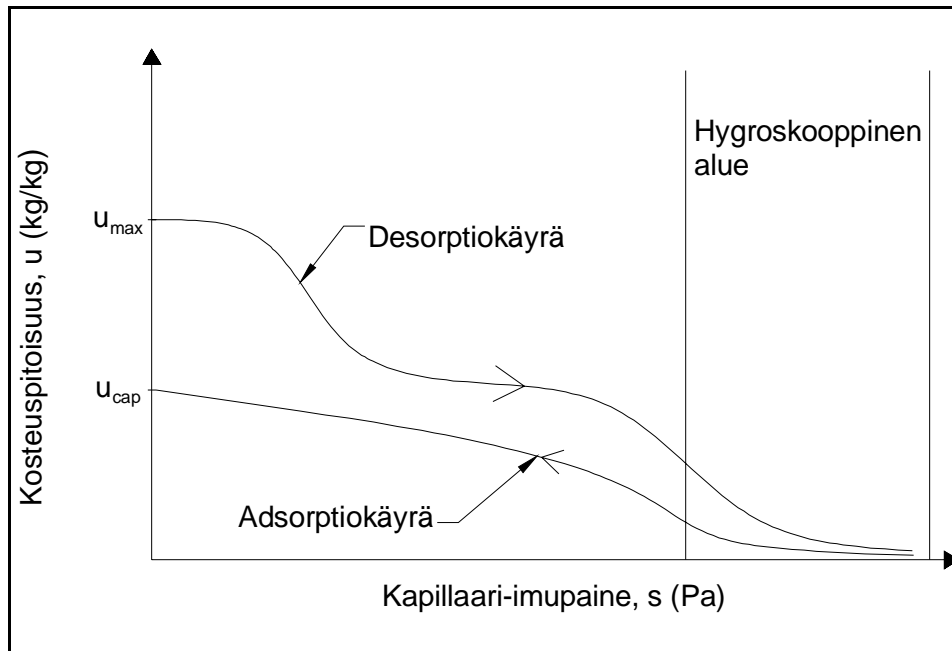
Kapillaarinen tasapainokosteus saavutetaan, kun veteen kosketuksissa olevaan aineeseen ei enää imeydy vettä. Tällöin aineeseen vaikuttavat kapillaarivoimat ovat tasapainossa. Jos huokoskooltaan kaksi erilaista materiaalia asetetaan kosketuksiin toisiinsa ja niissä on aluksi sama kosteuspitoisuus, alkaa kosteutta siirtyä alemman huokosalipaineen omaavasta materiaalista toiseen. Yleensä tämä liike on suurempihuokoisesta pienempihuokoiseen päin. Kapillaari-imun suuruus riippuu siitä, minkä kokoiset huokokset ovat vedellä täyttyneet. Kosteuden siirtyminen materiaalien välillä pysähtyy, kun molemmissa on sama huokosalipaine eli kapillaari-imu. /Pentti ja Hyypöläinen, s.29/



**Kuva 2.6** Periaatteellinen tasapainokosteuskäyrä, perustuu lähteeseen /Vinha/.

Kapillaarisella alueella kosteuspitoisuutta ei ole havainnollista kuvata hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän avulla, sillä huokosissa olevan ilman suhteellinen kosteus on lähes koko ajan 100 %. Tämän vuoksi kosteuspitoisuudet tällä alueella kuvataan yleensä kapillaarisen tasapainokosteuden avulla, jossa kosteuspitoisuus esitetään huokosalipaineen  $s$  (Pa) tai huokosen säteen  $r$  (m) funktiona. Kuvassa 2.7 on esitetty periaatteellinen kuva kapillaarisen alueen tasapainokosteuskäyrästä. Myös kapillaarisessa kosteuskäyrässä on havaittavissa eroa kuivumisen ja kostumisen välillä. Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän loppuosa, jossa huokosalipaine on suuri ( $\geq 2,65$  MPa), kuvaa kosteuspitoisuutta hygroskooppisella alueella. /Vinha/

Kapillaariseen tasapainokosteuteen lämpötilan vaikutus on suhteellisen pieni. Suurempi vaikutus tasapainokosteuteen on hygroskooppisella alueella, ja sielläkin lähinnä pienemmillä suhteellisen kosteuden arvoilla ( $RH < 20...30\%$ ). Materiaaleilla, joiden tasapainokosteus on ympäristön lämpötilasta riippuva, on selvästi korkeampi tasapainokosteus 20 % suhteellisessa kosteudessa kuin sellaisilla materiaaleilla, joiden kosteustasapaino ei ole lämpötilasta riippuva. Epäorgaanisilla materiaaleilla tasapainokosteuden riippuvuus lämpötilasta on yleensä hyvin pientä, orgaanisilla materiaaleilla sillä on jonkin verran merkitystä. /Pentti ja Hyyppöläinen, s.29/



Kuva 2.7 Periaatteellinen kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä, perustuu lähteeseen /Vinha/

## 2.4. Kosteuden siirtyminen rakenteissa

Kosteutta kulkeutuu rakennuksen käytön aikana seinärakenteeseen vesihöyryn diffuusiolla yhtenäisen materiaalikerroksen läpi, kosteuskonvektiolla rakenteiden epätiiveyskohdista sisäpuolisen ylipaineen vallitessa sekä viistosateella rakenteen saumojen epätiiveyskohtien kautta ja imeytymällä pinnasta kapillaarisesti materiaalin huokosiin. Kosteus poistuu rakenteesta ulkokuoren läpi sekä konvektiovirtauksilla tuuletusaukoista. /Lehtinen/

### 2.4.1. Kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarivirtausta voidaan kuvata pyöreän ohuen putken avulla, joka laitetaan alapäästään veteen. Tällöin vesi pyrkii nousemaan putken reunoja pitkin ylöspäin nesteen sisäisen koheesion sekä kapillaariputken ja nesteen välisen adheesion johdosta. Tämän seurauksena vedenpinta kaareutuu ja syntyy ns. meniskus. Kapillaarinen veden imeytyminen ja sitoutuminen riippuu kapillaarihuokosten koosta ja määrästä sekä huokosverkoston yhtenäisyydestä. Huokoskoon kasvaessa kapillaarinen imuvoima ja nousukorkeus vähenevät, mutta toisaalta virtausnopeus ja kosteuden johtavuus kasvavat. /Vinha; Petti, s. 34/

Kaarevan veden pintaan syntyy pintajännitys, joka aiheuttaa veden pinnan ja ilman välille paine-eron, jota kutsutaan huokosalipaineeksi. Huokosalipaineen johdosta vesi nousee huokosputkessa tasolle, joka on tasapainossa putkessa olevan veden aiheuttaman hydrostaattisen paineen kanssa. Tälle voimatasapainolle voidaan esittää kaava /Vinha; Pentti ja Hyyppöläinen, s. 34/

$$\pi \cdot \rho_w \cdot g \cdot h - 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \phi = 0 \quad (30)$$

- $\rho_w$  = veden tiheys  
 $g$  = putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 $s$  = veden pintajännitys, joka nostaa vettä ylöspäin putken reunoilla (N/m)  
 $r$  = huokosputken eli kapillaarihuokosen säde (m)  
 $\phi$  = reunakulma vesipinnan meniskuksen ja putken seinämän välillä (°)  
 (veden nousun edellytyksenä  $\phi < 90^\circ$ )

Kaavasta (30) saadaan edelleen huokosalipaineelle tasapainotilanteessa kaava (31). Huokosalipaineen ja suhteellisen kosteuden välille voidaan esittää yhteys Kelvinin lain avulla (Kaava 32). Kaavalla 32 voidaan laskea, kuinka paljon huokosilman suhteellisen kosteuden täytyy olla, jotta kapillaarikondenssi tapahtuisi. /Vinha/

$$\rho_w \cdot gh = s = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos \phi \quad (31)$$

$$\ln(\phi) = -\frac{sM_w}{\rho_w RT} \quad (32)$$

Huokosalipaine on suurimmillaan meniskuksen pinnassa ja alenee huokosputkessa alaspäin mentäessä. Veden pinnan yläpuolella vallitsee normaali ilmanpaine. Reunakulman ollessa likimain 0°, mikä on hyvä oletamus kapillaarisilla rakennusmateriaaleilla, voidaan kapillaariselle nousukorkeudelle johtaa kaavasta (41) yhtälö /Vinha/

$$h = \frac{2\sigma}{\rho_w gr} \quad (33)$$

Tämä nousukorkeus kuvaa sitä nousukorkeutta, johon vesi voi kapillaarihuokosissa enimmillään nousta. Raja on kuitenkin käytännössä liukuva, koska tällä alueella materiaalin kosteuspitoisuus muuttuu kapillaarisesta kyllästyskosteudesta huokosilman suhteellista kosteutta vastaavaan kosteuspitoisuuteen siirryttäessä kapillaariputkea ylöspäin. Lisäksi kapillaarisessa nousukorkeudessa on havaittavissa hystereesi-ilmiötä. Tällöin kostumisvaiheessa veden nousu pysähtyy ensimmäiseen kapillaarivirtauksen katkaisevaan riittävään suureen huokoseen. Vastaavasti materiaalin kuivuessa kosteus voi jäädä kapillaarista nousukorkeutta korkeammalle, mikäli siellä on riittävän pieniä huokosia. /Vinha/

Kapillaarisen kosteusvirran tiheys (kg/m<sup>2</sup>s) voidaan laskea kapillariteettikertoimen  $A_w$  avulla käyttämällä kaavaa (34). Kaavalla saadaan laskettua kapillaarisen kosteusvirran maksimiarvo tapauksessa, kun materiaalin toinen pinta on koko ajan kapillaarista kyllästyskosteutta vastaavassa tilassa. /Vinha; Hagentoft, s.100/

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (34)$$

- $A_w$  = kapillariteettikerroin (kg/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>)  
 $t$  = aika (s)

Kapillariteettikerroin pysyy vakiona ainoastaan tietyn ajan sen jälkeen, kun kosteutta on alkanut siirtyä materiaaliin. Kun kapillaarinen kyllästyskosteus on

saavutettu, alkaa veden siirtyminen materiaaliin hidastua oleellisesti. Tämän jälkeen kapillaarivirtaus on hyvin pientä kunnes se loppuu kokonaan. Materiaalin ajassa  $t$  (s) siirtyneen veden kokonaismäärä voidaan arvioida kaavalla /Vinha; Hagentoft, s.100/

$$m' = \int_0^t g dt = A_w \sqrt{t} \quad (35)$$

Veden tunkeutumissyvyys tietyllä ajanhetkellä voidaan laskea kaavalla (35), kun tunnetaan materiaalin veden tunkeutumiskerroin  $B_w$  ( $m/s^{1/2}$ ). Tunkeutumisen maksimi arvo on sama kuin kapillaarinen nousukorkeus. /Vinha/

$$x_p = B_w \sqrt{t} \quad (36)$$

Kapillaarista kosteuden siirtymistä tapahtuu materiaaleissa kuitenkin kosteuspitoisuuden ollessa korkea, vaikka kosketusta vesipintaan ei olisikaan. Kapillaarivirtaus voi tapahtua myös sivusuunnassa tai alaspäin, jolloin painovoima ei rajoita kosteuden siirtymistä. Tällaisissa tapauksissa voidaan kapillaarinen kosteusvirta ( $kg/m^2s$ ) laskea Darcyn lain avulla /Vinha/

$$g_{cap} = -\rho_w \frac{k_w}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -\kappa_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (37)$$

$k_w$  = materiaalin permeabiliteetti vedelle ( $m^2$ )

$\eta_w$  = veden dynaaminen viskositeetti ( $Ns/m^2$ )

$\kappa_w$  = kosteudenjohtavuus ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ )

#### 2.4.1.1 Kosteusdiffusiviteetti

Kosteusdiffusiviteetillä kuvataan sitä, kuinka nopeasti kosteuspitoisuus materiaalissa muuttuu uuteen tasapainotilaan. Mitä suurempi materiaalin kosteusdiffusiviteetti on, sitä nopeammin se saavuttaa tasapainokosteuden ulkopuolisen suhteellisen kosteuden muuttuessa. Kosteusdiffusiviteetin arvo sisältää kaikkien kosteudensiirtymismuotojen vaikutuksen. Näin ollen se voidaan määrittää myös hygroskooppisella alueella oleville materiaaleille. Hygroskooppisella alueella kosteusdiffusiviteetti voidaan määrittää materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden  $d_v$  avulla. /Vinha/

$$D_w = \frac{\delta_v v_{sat}}{\xi_\phi} \quad (38)$$

$x_f$  = materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella ( $kg/m^3$ )

$$\xi_\phi = \frac{\partial W}{\partial \phi} \quad (39)$$

WUFI-ohjelmassa käytetään suhteellista kosteutta kapillaarisen virtauksen siirtopotentialina. Näin voidaan menetellä, sillä suhteellisen kosteuden ja huokosalipaineen välinen suhde on määritelty Kelvinin lain avulla. Kapillaarinen kosteusvirta voidaan esittää muodossa /Vinha/

$$g_{cap} = -D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (40)$$

$D_f$  = materiaalin vedenjohtavuuskerroin ( $kg/m \cdot s$ )

$$D_{\varphi} = D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (41)$$

Varsinaisen kapillaarisen kosteuden siirtymisen loputtua jatkaa kosteus vielä kapillaarista liikettä pyrkien jakaantumaan materiaalissa tasaisemmin. Tätä kutsutaan kosteuden uudelleenjakaantumiseksi. Joissakin laskentaohjelmissa, kuten WUFI:ssa, otetaan myös tämä siirtymismuoto huomioon. Kosteusdiffusiviteetin arvo kosteuden uudelleenjakaantumiselle on arvioitu olevan kymmenesosa varsinaisen kosteudiffusiviteetin arvosta. /Vinha/

#### 2.4.1.2 Viistosateen imeytyminen

Viistosateen aiheuttama veden absorptio materiaalin pinnalta riippuu seuraavista reunaehdoista. Niin kauan kuin sateelle alttiin pinnan vesipitoisuus on alle kapillaarisen vesipitoisuuden, pysyy veden imeytymisnopeus materiaaliin samana kuin viistosateen intensiteetti. Kun pinta saavuttaa kapillaarisen kosteuspitoisuuden, muodostuu pinnan päälle vesikalvo ja kapillaarinen imu alkaa. [Hens, s.223]

Niin kauan kun pinnan kosteuspitoisuus pysyy kapillaarisen alueen alapuolella, voidaan reunaehdot vesipitoisuudelle esittää seuraavasti, kun kriittinen kosteuspitoisuus  $w_{cr}$  on paljon kapillaarista kosteuspitoisuutta  $w_c$  pienempi. Tällöin reunaehdot ovat:  $t \leq 0, 0 \leq x < \infty: w=0; t \geq 0, x=0: D_w(dw/dx)_{x=0} = g_{ws}$ . Viistosateen intensiteettiä  $g_{ws}$  ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) voidaan arvioida esim. kohdan 2.2.1 mukaan. Tällöin pinnan ( $x=0$ ) kosteuspitoisuus voidaan laskea yhtälöllä /Hens/

$$w_s = \frac{2 \cdot g_{ws}}{D_w} \cdot \sqrt{\frac{D_w t}{\pi}} \quad (42)$$

Hetki, jolloin vesikalvo muodostuu pintaan ja kapillaarinen imu alkaa voidaan laskea kaavalla /Hens/

$$t_f = \frac{\pi \cdot D_w \cdot w_c^2}{4 g_{ws}^2} = \frac{\pi^2 A^2}{16 g_{ws}^2} \quad (43)$$

Vedenimeytymiskertoimen  $A$  ja viistosateen intensiteetin  $g_{ws}$  ollessa suuri, muodostuu kalvo julkisivun pintaan nopeasti ja vesi valuu pois. Tämä aiheuttaa lisää kosteusrasitusta julkisivun alaosiin, jolloin liitokset ja niiden saumaukset tulevat kriittisemmiksi paikoiksi. Materiaalit, joilla on korkea vedenimeytymiskerroin kuten useimmat tiilet, imevät sateen lähes kokonaan suoraan ja vain rankkojen sadekuurojen aikana muodostuu julkisivupintaan valuva vesikalvo. /Hens, s.224/

#### 2.4.2. Vesihöyryn diffuusio

Seinärakenteen läpi tapahtuva kosteuden diffuusio aiheutuu rakenteen eri puolilla vallitsevista ilman kosteuspitoisuuden eroista, eli toisin ilmaistuna vesihöyryn osapaineiden eroista. Kosteus pyrkii tasoittumaan, jolloin kosteuden kulkusuunta on suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Suomessa ilmasto on sellainen, että etenkin talvella normaalissa huonetilassa diffuusio suuntautuu sisätiloista ulkovaipan läpi ulkoilmaa kohden. Sisäilman kosteuspitoisuuden kasvaessa myös

osapaineiden ero kasvaa, ja siten diffuusion kuljettaman kosteuden määrä kasvaa. Kesäisin diffuusion suunta voi vaihdella riippuen sisä- ja ulkoilman olosuhteista. /Pentti ja Hyypöläinen/

Homogeenisessä ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys voidaan laskea Fickin lain avulla. Yleisessä muodossa esitettyä Fickin laki saa muodon /Vinha/

$$g = -\delta_v \nabla v = -(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (44)$$

$d_v$  = aineen vesihöyrynläpäisevyys ( $m^2/s$ )

$x, y, z$  = kosteusvirran suuntakoordinaatit (m)

$$g = -\delta_p \nabla p = -(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}) \quad (45)$$

$d_p$  = aineen vesihöyrynläpäisevyys ( $kg/m \cdot s \cdot Pa$ )

Joissakin laskentaohjelmissa, kuten WUFI:ssa, materiaalin vesihöyrynvastus ilmoitetaan absoluuttisen arvon sijasta suhteena ilman vesihöyrynläpäisevyyteen. Tämä diffuusiovastuskerroin, ns.  $m$ -arvo (-), voidaan laskea seuraavasti. /Vinha/

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \quad \text{tai} \quad \mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (46)$$

$D_a$  = ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna ( $m^2/s$ )

$d_a$  = ilman vesihöyrynläpäisevyys osapaine-eron avulla ilmaistuna ( $kg/msPa$ )

$d_{v,p}$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys  $m^2/s$  ( $d_v$ ) tai  $kg/msPa$  ( $d_p$ )

Vesihöyrynläpäisevyys materiaalissa ei ole vakio, vaan riippuu lämpötilasta ja huokosilman suhteellisesta kosteudesta. Yksi tapa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden määrittämiseksi on ns. kuppikoe. Kokeen perusteella määritetyt vesihöyrynläpäisevyyden arvot voivat muuttua merkittävästi kosteuspitoisuuden/ huokosilman RH:n kasvaessa. Kosteusvirran tiheyden kasvu johtuu kuitenkin pääasiassa pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta. Kaasudiffuusiolla siirtyvän vesihöyrymäärä pysyy hygroskooppisella kosteusalueella melko vakiona. /Vinha/

Kapillaarisella alueella diffuusion kautta siirtyvän vesihöyrymäärä pienenee huokosten täytyessä vedellä siten, että huokosissa tapahtuva vesihöyrymäärä siirtyminen hankaloituu. Kuppikokeella määritetyt vesihöyrynläpäisevyydet ovat siis usean kosteuden siirtymismuodon summa. Kuppikokeesta on syytä huomata, että siinä kaikki kosteuden siirtymismuodot vaikuttavat samaan suuntaan, koska kokeessa ei ole lämpötilaeroa. Lämpötilaeroista johtuen todellisissa rakenteissa kaasudiffuusion suunta voi poiketa pintadiffuusion ja kapillaarisen siirtymisen suunnasta. /Vinha/

Diffuusion tapauksessa kosteus pyrkii siirtymään suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään, kun taas pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta kosteus pyrkii siirtymään suuremmasta kosteuspitoisuudesta/huokosilman suhteellisesta

kosteudesta pienempään. Talviaikaan vaipan ulko-osissa materiaalien kosteuspitoisuudet ovat yleensä korkeita vaikka ulkoilman vesihöyrypitoisuus onkin pieni. /Vinha/

Lähteessä /Vinha/ esitetään materiaalin vesihöyrypitoisuudelle kohdassa x kaavaa

$$v_x = v_i - \frac{\sum_{n=i}^x Z_{v,n}}{Z_{v,tot}} (v_i - v_e) \quad (47)$$

$v_i, v_e$  = sisä- ja ulkoilman vesihöyrynkosteuspitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )

$\sum_{n=i}^x Z_{v,n}$  = rakenteen vesihöyrynvastusten summa sisäilmasta kohtaan x ( $\text{s/m}$ )

$Z_{n,tot}$  = kokorakenteen vesihöyrynvastus ( $\text{s/m}$ )

### 2.4.2.1 Diffuusio tuuletusurassa

Lähteessä /Lehtinen et. al., s. 24..26/ on esitetty analyyttinen laskentamenetelmä tuuletusurien kosteuden poistokyvylle. Tuuletusurasta kosteus poistuu sekä diffuusion avulla että konvektiolla ilmavirtauksen mukana. Puhdas diffuusio on käytännön rakenteissa harvinainen, sillä yleensä tuuletusuran eri osien välillä on lämpötilaeroja, jotka aiheuttavat ilmavirtauksia. Vesihöyryn diffuusion vaikutuksesta uran seinämistä kanavan ilmatilaan voidaan esittää käyttäen hyväksi modifioitua pintavastusta ja osapaine-eroa seuraavasti /Lehtinen et. al./

$$dG_z = \beta' \cdot (p_w - p_z) \cdot u \cdot dz \quad (48)$$

$\beta'$  = muunnettu pinnan kosteudensiirtokerroin ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ )

$u$  = tuuletusuran piiri (m)

$p_w$  = vesihöyryn osapaine tuuletusuran pinnalla (Pa)

$p_z$  = vesihöyryn osapaine tuuletusurassa (Pa)

Uran suuntainen kosteusvirta puolestaan riippuu osapaine-eroista tuuletusuran osien välillä sekä ilman läpi /Lehtinen et. al./

$$G_z = -A \cdot \delta \cdot \frac{dp}{dz} \quad (49)$$

$A$  = tuuletusuran pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$\delta$  = ilman vesihöyrynläpäisevyys ( $\text{kg/Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ )

Differentioimalla edellinen saadaan /Lehtinen et. al./

$$\frac{dG_z}{dz} = A \cdot \delta \cdot \frac{d^2 p}{dz^2} \quad (50)$$

Jos tuuletusurassa ei tapahdu kondensoitumista, voidaan tasapainotilalle esittää muodossa /Lehtinen et. al./

$$\frac{d^2 p_z}{dz^2} - m^2 \cdot p_z + m^2 \cdot p_w = 0 \quad (51)$$



Differentiaaliyhtälölle esitetään lähteessä /Lehtinen et. al./ Gertisin ratkaisu. Ratkaisussa oletetaan, että uran yläpää rajoittuu ulkoilman mukaiseen tilaan ja alapäähän ei ole muodostunut osapaine-eroa. Tällöin ratkaisu voidaan esittää

$$p_z = p_w - \left( \frac{p_w - p_u}{\cosh(m \cdot l)} \right) \cdot \cosh(m \cdot z) \quad (52)$$

$$m = \sqrt{\frac{\beta \cdot u}{\delta \cdot A}} \quad (53)$$

Jos vesihöyrynpainejakauma tunnetaan, pystytään vesihöyryyn diffuusiolla poistuva kosteus määrä laskemaan seuraavalla kaavalla, kun käytetään tuuletusuran loppupään mukaista osapaine-eroa potentiaalina /Lehtinen et. al./

$$G_{z=l} = A \cdot \delta \cdot m \cdot (p_w - p_a) \cdot \tanh(m \cdot l) \quad (54)$$

Diffuusiolla tapahtuva kosteuden poistuminen on kuitenkin käytännössä vähäistä. Tämä johtuu ilman kosteussisällön tasaantumisen jo lyhyellä matkalla ja siitä, että uran seinästä ei enää siirry kosteutta ilmatilaan. Kosteuden poistuminen riippuu poistoaukon koosta ja tuuletusuran pituudesta. /Lehtinen et. al./

### 2.4.3. Vesihöyryyn konvektio

Virtaavan ilman mukana kosteutta siirtyy vesihöyryinä samaan tapaan kuin lämpöenergiaakin. Rakenteissa konvektiovirtaukset voivat kulkea rakenteessa olevien rakojen ja reikien kautta sekä ilmaa läpäisevien materiaalien läpi. Talviaikana lämpimän ilman virratessa ulospäin ilma jäähtyy, jolloin suhteellinen kosteus kasvaa, mikä saattaa aiheuttaa kondenssia. Toisaalta sisäänpäin virtaava ilma lämpenee, jolloin suhteellinen kosteus laskee, mikä vastaavasti aiheuttaa rakenteen kuivumista. /Vinha/

Kosteuden konvektiotarkastelut ovat analogisia lämmönsiirron konvektio tarkasteluihin. Kosteuden konvektiota tarkasteltaessa ei kuitenkaan ole tarvetta käyttää dimensiottomia lukuja kuten lämmönsiirrossa. Materiaalin läpi konvektion välityksellä siirtyvälle kosteusvirran absoluuttiselle tiheydelle voidaan esittää yhtälö /Vinha/

$$g_{conv,abs} = r_a \cdot v \quad (55)$$

$$r_a = \text{ilmavirran tiheys (m}^3\text{/(m}^2\cdot\text{s))}$$

$$v = \text{materiaalin läpi virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m}^3\text{)}$$

#### 2.4.3.1 Konvektio ilmavälissä

Tuuletusvälin vesihöyrypitoisuuden laskentakaavat ovat analogisia lämpötilan laskentakaavojen kanssa. Vakio ilmavirtauksella tuuletusvälin vesihöyrypitoisuus etäisyydellä x(m) tuloilmakohdasta eteenpäin voidaan laskea kaavalla /Vinha/

$$\nu(x) = \nu_0 + (\nu_{in} - \nu_0) \cdot e^{\frac{-x}{l_{cv}}} \quad (56)$$

$$\nu_{in} = \text{tuuletusväliin tulevan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m}^3\text{)}$$

$v_0$  = tuuletusvälin keskimääräinen vesihöyrypitoisuus kaukana ilmavirtauksen sisääntulokohdasta, tai kun tuuletusvälissä ei ole ilmavirtausta ( $\text{kg/m}^3$ )

$l_{cv}$  = karakteristinen pituus (m)

Vastaavasti tuuletusvälin keskimääräinen vesihöyrypitoisuus  $v_0$  sekä karakteristinen pituus  $l_{cv}$  voidaan laskea kaavoilla /Vinha/

$$v_0 = \frac{\beta_{v+} \cdot v^+ + \beta_{v-} \cdot v^-}{\beta_{v+} + \beta_{v-}} \quad (57)$$

$b_{n+}$  = tuuletusvälin lämpimämmän pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

$b_{n-}$  = tuuletusvälin kylmemmän pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

$n^+$  = tuuletusvälin lämpimämmän pinnan vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )

$n^-$  = tuuletusvälin kylmemmän pinnan vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )

$$l_{cv} = \frac{\rho_a c_{pa} R_a}{B(\beta_{v+} + \beta_{v-})} \quad (58)$$

$R_a$  = ilman tilavuusvirta tuuletusvälissä ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$B$  = tuuletusraon leveys sivusuunnassa (m)

Ilman tilavuusvirran muuttuessa tuuletusvälissä myös pintojen vesihöyrypitoisuudet ja kosteudensiirtokertoimet muuttuvat. Tällöin laskenta tulee tehdä virtauslaskentaohjelman avulla. /Vinha/

### 2.4.3.2 Konvektio tuuletusurassa

Konvektion mukana poistuvan kosteuden määrä riippuu virtaavaan ilmaan sitoutuneesta vesihöyryn määrästä sekä ilman tilavuusvirrasta. Tuuletusuran ilmatilaan uran seiniltä siirtyvä kosteus voidaan ilmaista haihtumiskertoimella, jolloin /Lehtinen et. al./

$$dG_z = \sigma \cdot (v_w - v_z) \cdot u \cdot dz \quad (59)$$

$v_w$  = ilman vesipitoisuus tuuletusuran pinnalla ( $\text{kg/m}^3$ )

$v_z$  = ilman vesipitoisuus tuuletusurassa ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\sigma \approx \beta \cdot \frac{p_2}{R_2 \cdot T} \approx \beta \cdot \rho \quad (60)$$

Uran suunnassa siirtyvä kosteus määrä riippuu urassa liikkuvasta massavirrasta /Lehtinen et. al. /

$$dG_z = \dot{m} \cdot da = v \cdot \rho \cdot A \cdot da \quad (61)$$

Yhtälöiden (59) ja (61) mukaisessa tasapainotilanteessa voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö /Lehtinen et. al./

$$\frac{da}{dz} + \frac{4 \cdot \beta}{v \cdot d} \cdot v_z - \frac{4 \cdot \beta}{v \cdot d} v_w = \frac{da}{dz} + k \cdot v_z - k \cdot v_w = 0 \quad (62)$$

Käytettäessä reunaehtona tuuletusuran alapäässä ulkoilman kosteussisältöä saadaan yhtälölle ratkaisuksi /Lehtinen et. al./

$$v_z = v_w - (v_w - v_u) \cdot e^{-kz} \quad (63)$$

Poistuva kosteusvirta voidaan laskea kaavalla

$$G_{z=l} = \frac{v \cdot \rho \cdot A}{4} \cdot (v_{(l)} - v_{(u)}) \quad (64)$$

$v$  = virtausnopeus kanavassa m/s

Lähteessä /Lehtinen et. al., s.27/ on tutkittu laskennallisesti tuuletusurassa virtaavan kosteudenpoistokykyä laskennallisesti. Tuloksista käy ilmi, että urassa virtaavan ilman kosteuspitoisuus nousee eniten ensimmäisen metrin matkalla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tehokkaan tuuletuksen takaamiseksi tulisi tulo- ja poistoilmauukkoja sijoittaa tiheästi korkeussuunnassa. Tuuletus jää vähäiseksi tapauksissa, joissa tuuletusaukot ovat vain seinän ala- ja yläosassa. /Lehtinen et. al./

## 2.5. Kosteuden tiivistyminen ja haihtuminen

### 2.5.1. Kosteuden kerääntyminen seinärakenteeseen

Kostean ilman joutuessa kosketuksiin sellaisen pinnan tai huokosseinämän kanssa, jonka lämpötila alittaa ilman kastepistelämpötilan, tapahtuu pinnalla kosteuden tiivistymistä vedeksi. Tämä tiivistyvä vesimäärä on kyseessä olevan lämpötilan kyllästyskosteuden ylittävä vesimäärä. Kosteutta voi tiivistyä seinärakenteen pintaan tai sen sisälle. /Björkholz, s.64/

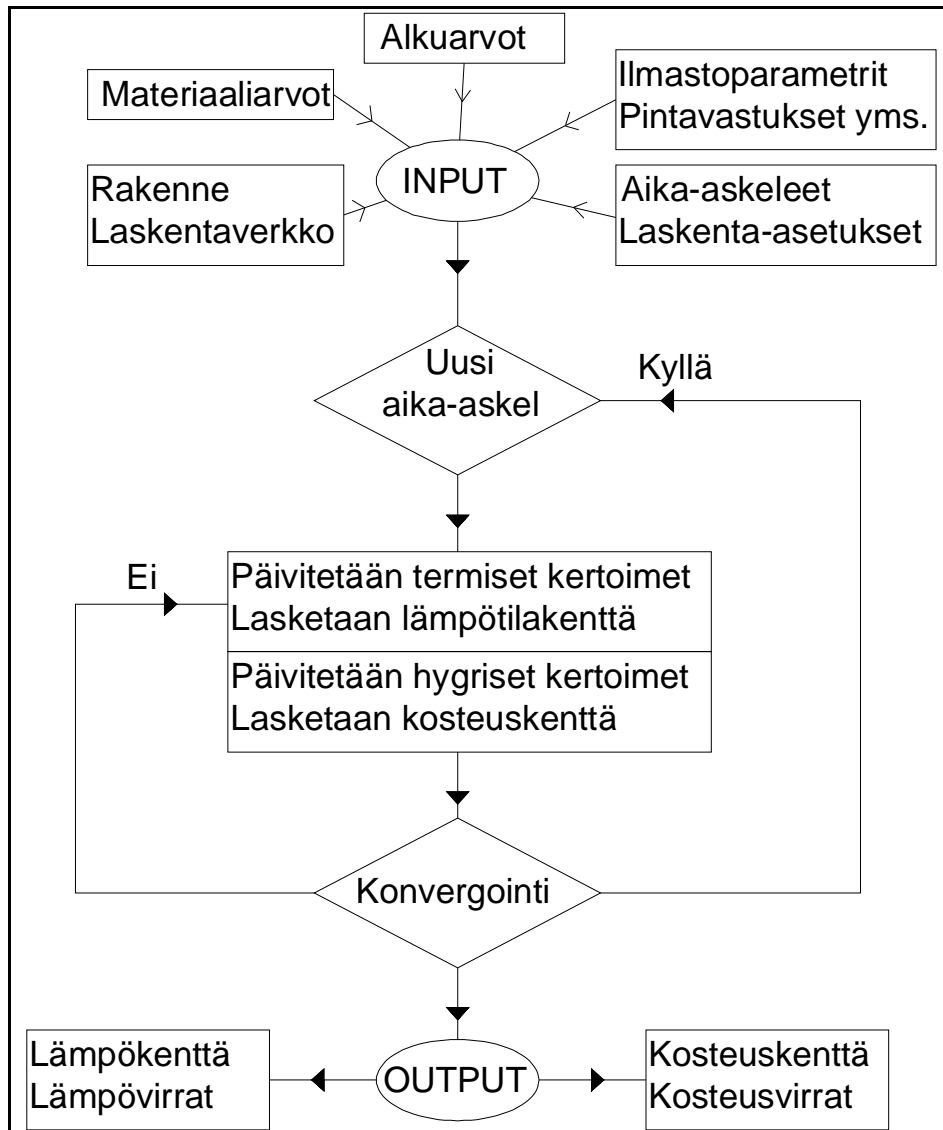
Kosteuden tiivistymistä tarkasteltaessa tulee ensimmäisenä tutkia, onko tiivistyminen ylipäättään mahdollista. Jos tiivistymistä tapahtuu, täytyy selvittää tiivistyvän kosteuden määrä ja tiivistymistajuus tiivistymisen ollessa sallittua. Jos tiivistymistä ei puolestaan sallita, täytyy rakennetta sekä mahdollisesti myös ympäristöä muokata siten, ettei tiivistymistä enää tapahdu. Yleensä lyhytaikaisesta kosteuden tiivistymisestä ei ole haittaa. Sen sijaan jatkuvasti toistuvat ja pitkäkestoiset tiivistymiset saattavat aiheuttaa hometta tai muita haittoja. /Björkholz, s.64/

Kosteuden tiivistymisen kannalta oleellisia tekijöitä ovat sisäpinnan ja rakenteen lämmönvastukset, sisäilman kosteuspitoisuus sekä ulkoilman lämpötila. Ulkoilman lämpötila pois lukien voidaan tiivistymiseen vaikuttaviin tekijöihin vaikuttaa teknisillä ratkaisulla. Kosteuden tiivistymistä ulkoseinän sisäpintaan voidaan estää esimerkiksi tehostamalla ilmanvaihtoa tai pintalämpötilaa nostamalla hyvän lämmöneristyksen avulla. Hyvin toimivissakin ulkoseinärakenteissa voi esiintyä runsasta tiivistymistä pitkään jatkuvien pakkaskausien aikana. /Pentti ja Hyypöläinen, s.37; Björkholz, s.64/

#### 2.5.1.1 Diffuusion kondenssi

Käytännössä useimmat seinärakenteet ovat jatkuvassa dynaamisessa muutostilassa. Jos halutaan tarkastella kosteusolosuhteiden vaihtelua lyhyellä aikavälillä esim. vuorokausi, täytyy laskelmat tehdä epästationäärisessä tilassa, jolloin kosteusvirta ei ole ajan suhteen vakio. Joillekin epästationäärisille diffuusiota tapauksille on esitetty ratkaisuja lähteessä /Vinha/, mutta pääsääntöisesti laskenta on sen verran työlästä, että laskelmat tehdään laskentaohjelmilla. Kuvassa (Kuva 2.8) on esitetty vuokaaviona WUFI-

ohjelmassa käytössä oleva laskentamenettely epästationääriselle tilalle. /Pentti ja Hyypöläinen, s.38/



**Kuva 2.8** Kuvassa (perustuu lähteeseen /Künzel/) on esitetty WUFI:n tapa ratkaista annettu ongelma. Lähteessä /Künzel/ on esitetty tarkemmin teoriaa epästationäärisen tilan yhtälöistä ja ratkaisuista.

Käsilaskennalla voidaan kuitenkin arvioida tiivistyvää kosteusmäärää yksinkertaistamalla tapausta. Käsilaskennassa jaetaan yleensä vuosi kahteen osaan, tiivistymisjaksoon ja kuivumisjaksoon, joiden pituus on esimerkiksi 60 vrk. Ilmastoparametreiksi valitaan vuoden kahden kylmimmän kuukauden keskiarvot. Laskelmissa ei oteta huomioon materiaalien kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta eikä diffuusion kondenssia tarkastellessa oteta huomioon muita kosteuden siirtomuotoja. Myöskään kosteuden- ja lämmönsiirron välistä yhteyttä ei oteta huomioon, kuten ei myös tuuletusrakojen vaikutusta. Ympäristöolosuhteet otetaan huomioon hyvin karkeasti. Menetelmä perustuu stationääriseen tilaan, jossa oletetaan kosteusvirran ja laskennan reunaehtojen olevan ajan suhteen vakioita. /Pentti ja Hyypöläinen, s. 38/

Jos rakenteen sisällä tapahtuu tiivistymistä alueella A- B, voidaan aikayksikössä kondensoitunut kosteus määrä neliölle,  $g_{cond}$  (kg/m<sup>2</sup>s), laskea kaavalla /Vinha/

$$g_{cond} = \frac{V_i - V_B}{Z_{v,B}} - \frac{V_A - V_e}{Z_{v,A}} \quad (65)$$

$Z_{v,B}$  = sisäilman ja kohdan B välisten materiaalikerrosten vesihöyryn vastusten summa (s/m)

$Z_{v,A}$  = ulkoilman ja kohdan A välisten materiaalikerrosten vesihöyryn vastusten summa (s/m)

Kaavassa (65) ensimmäinen termi kuvaa sisältäpäin diffuusion vaikutuksesta kohtaan A tulevaa ja kondensoituvaa kosteusvirtaa. Jälkimmäinen termi puolestaan kuvaa kohdasta B ulospäin suuntautuvaa kosteusvirtaa. Näiden kahden termin erotus on välillä A-B kondensoituvaa vesimäärä. Tavallisesti kondensoituminen tapahtuu kahden eri materiaalin rajapinnassa, jolloin myös yhtyvät kohdat A ja B. Tiivistymiskauden aikana tiivistyvän kosteuden määrä voidaan laskea yhtälöllä /Vinha/

$$m''_{cond} = g_{cond} \cdot t_{cond} \quad (66)$$

$t_{cond}$  = kondensoitumisjakson pituus (s)

Vastaavasti tarkasteltaessa kuivumista valitaan kuivumisjaksoksi yhtä pitkäjakso kuin tiivistymiselle. Seinärakenteille ilmastoparametreina käytetään kahden lämpimimmän kuukauden keskiarvoja. Tiivistymiskohdasta kuivuva kosteus määrä neliölle voidaan laskea yhtälöllä

$$g_{dry} = \frac{V_A - V_e}{Z_{v,A}} + \frac{V_B - V_i}{Z_{v,B}} \quad (67)$$

Kaavassa (67) ensimmäinen termi kuvaa kuivumista tiivistymiskohdasta ulospäin ja vastaavasti jälkimmäinen termi kuivumista tiivistymiskohdasta sisäänpäin. Jos kuivumiskaudellakin sisäilman kosteus pitoisuus on suurempi kuin tiivistymiskohdassa, kulkeutuu kosteutta sisältä tiivistymiskohtaan. Kuivumiskaudella rakenteesta poistuvan kosteuden määrä voidaan laskea kaavalla /Vinha; Pentti ja Hyypyläinen, s.40/

$$m''_{dry} = g_{dry} \cdot t_{dry} \quad (68)$$

$t_{dry}$  = kuivumisjakson pituus (s)

### 2.5.1.2 Konvektion kondenssi

Konvektion mukana tapahtuva kosteudensiirto tapahtuu ensisijaisesti raoissa ja rei'issä. Merkittäväksi konvektion aiheuttama kondenssi muodostuu mm. puu- ja teräsrunkoisissa ulkoseinissä. Ilmavuodoille alttiita paikkoja ovat lisäksi elementtien väliset saumat sekä eri rakennusosien liitokset. Pitkien pakkaskausien aikana on mahdollista, että ilmavuoto kohtiin kertyy runsaasti jäätä, joka sulaa myöhemmin ja aiheuttaa samalla "vesivuodon" kaltaisen haitan. /Pentti ja Hyypyläinen, s.41-42/

Kondenssin määrä on vaikea arvioida, sillä esimerkiksi reiän läpi tapahtuvassa ilmavirtauksessa vain osa kosteudesta tiivistyy ja loput menevät ilmavirtauksen mukana lävitse. Ilmavuotojen kondenssi riippuu ulkoilman lämpötilasta, rakenteeseen virtaavan

ilman lämpötilasta ja sen jäähtymisestä rakenteen sisällä sekä ilmavirtauksen kosteuspitoisuudesta ja sen tasaisuudesta. Maksimaalista kondenssia voidaan arvioida kaavalla (55). /Pentti ja Hyypyläinen, s.42/

### 2.5.2. Seinärakenteen kuivuminen

Ulkoseinien kastuminen johtuu ensisijaisesti viistosateesta. Diffuusion ja konvektion vaikutukset tavanomaisten seinärakenteiden kostumiseen ovat viistosateeseen verrattuna pieniä. Ulkoseinärakenteen kuivuminen sateen jälkeen riippuu suhteellisesta ilman kosteudesta, auringon lämpösäteilyn aiheuttamasta erosta ulkoilman ja julkisivupinnan välille sekä tuulesta. Tuulen ja auringon säteilyn voimakkuus riippuvat mm. vuodenajasta sekä julkisivun ilmansuunnasta. Kuivuminen tapahtuu huomattavasti hitaammin kuin kastuminen. /Pentti ja Hyypyläinen, s.42; Björkholz, s.79/

Kuivuminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa rakenteen ulkopinta on kostea eli pintaan rajoittuvissa huokosissa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Tällöin kosteus siirtyy rakenteesta pois kapillaarivirtauksen, pintadiffuusion ja diffuusion avulla. Kosteuden haihtuminen pinnasta ilmaan määrää kuivumisnopeuden, joten kosteuspitoisuus on lähes sama eri syvyyksillä rakenteessa. Ensimmäisessä vaiheessa haihtuvan kosteuden määrää  $g$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) voidaan arvioida yhtälöllä /Vinha; Pentti ja Hyypyläinen, s. 42/

$$g = \beta_v (v_{s(T_s)} - v_a) \quad (69)$$

$v_a$  = ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus

$v_{s(T_s)}$  = huokosilman kyllästyskosteus haihduttavassa pinnassa

$T_s$  = haihduttavan pinnan lämpötila

$$\beta_v = \frac{\alpha_{conv}}{\rho_a c_a} \quad (70)$$

Pinnan lämpötilaa voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä /Pentti ja Hyypyläinen, s. 42-43/

$$T_s = \frac{a \cdot I + \frac{T_i}{R_0} + h_u \cdot T_e - r \cdot g}{\frac{1}{R_0} + h_u} \quad (71)$$

$a$  = pinnan absorptiokerroin lyhytaaltoiselle säteilylle

$I$  = lyhytaaltoisen säteilyn teho ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$h_u$  = ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$T_i, T_s$  = sisä- ja ulkolämpötilat ( $^\circ\text{C}$ )

$R_0$  = Rakenteen lämmönvastus sisäpinnasta ulkopintaan ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )

$r$  = höyrystymislämpö ( $\text{J}/\text{kg}$ )

$g$  = haihtuva kosteusvirta ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )

Rakenteen kosteuspitoisuuden täytyy ylittää kriittinen kosteuspitoisuus, jotta rakenteen pinta voisi olla pitkään kostea. Tällöin kosteuden liike on kapillaarista nestevirtausta. Pinnan kosteana pysyminen riippuu siitä, kuinka nopeasti vesi voi

liikkua aineen kapillaarihuokosverkostossa. Esimerkiksi suurihuokosinen tiili kuivuu pääasiassa ensimmäisen vaiheen mukaan, kun taas vanha betoni kastuttuaan ei käytännössä kuivu lainkaan ensimmäisen vaiheen mukaan. Betonilla tämä johtuu siitä, että pinta kuivuu nopeasti hygroskooppiselle alueelle ja kuivuminen hidastuu. /Vinha; Pentti ja Hyypöläinen, s.42/

Rakenteen kuivumisen edettyä niin pitkälle, että kapillaarinen kosteusvirta ei riitä enää pitämään pintaa kosteana ( $w < w_{crit}$ ), pyrkii rakenteen pinta asettumaan tasapainoon ulkoilman kanssa. Tällöin kosteuden siirtyminen hidastuu, mutta siirtyminen tapahtuu osittaisen kapillaarivirtauksen avulla, pintadiffuusion ja diffuusion avulla. Toisessa vaiheessa rakenteen kosteuspitoisuus pienenee nopeammin pinnan läheisyydessä kuin rakenteen keskellä. /Vinha/

Kolmannessa vaiheessa rakenteen ulkopinta saavuttaa hygroskooppisen tasapainokosteuden, eikä rakenteen ulkopinnan kosteus enää laske. Tällöin rakenne kuivuu ainoastaan sisältä. Ulkoilman suhteellisesta kosteudesta riippuen kapillaarinen kosteudensiirto ja pintadiffuusio voivat loppua kokonaan tai niiden osuus jää vähäiseksi. Käytännössä tässä vaiheessa rakenteen kuivumisnopeus riippuu rakenteen sisäosan ja pinnan välisestä vesihöyrynvastuksesta  $Z_{n,rak}$ . /Vinha/

Rakennuskosteuden kuivuminen betonista voidaan jakaa haihtumiskuivumiseen ja sitoutumiskuivumiseen. Veden siirtymistä diffuusion ja kapillaarivirtauksen vaikutuksesta pinnalle, josta se voi haihtua ympäröivään ilmaan kutsutaan haihtumiskuivumiseksi. Veden sitoutumista betonin sementin ja veden välisen kemiallisen reaktion eli hydratoitumisen kautta kutsutaan sitoutumiskuivumiseksi. Sementin hydratoituminen muuttaa betonin huokosrakennetta siten, että kapillaarihuokosten tilavuus pienenee ja betonista tulee tiiviimpää. Betonin tiivistymisen myötä betonin vesihöyrynläpäisevyys ja kosteudensiirtokyky muuttuvat. Tämä selittää osaltaan sen, miksi vanhan betonin kuivuminen on hitaampaa kuin uuden betonin. /Pentti ja Hyypöläinen, s. 44/

Betonin koostumus ja etenkin vesisementtisuhte vaikuttavat merkittävästi betonin kuivumisnopeuteen. Alhaisella vesisementtisuhteella suuri osa valmistusvaiheessa lisätystä vedestä sitoutuu sementin hydratoituessa, ja näin ollen ylimääräisen haihtuvan veden määrä jää pieneksi. Tämän vuoksi usein alhaisen vesisementtisuhteen omaava betoni kuivuu nopeammin kuin korkean vesisementtisuhteen omaava betoni, huolimatta alhaisen vesisementtisuhteen aiheuttamasta pienemästä vesihöyryn läpäisevyydestä. Ylimääräistä kosteutta betoniin tuo kuitenkin rakennusaikana sinne pääsevä sadevesi. /Pentti ja Hyypöläinen, s.44/

Betonin kuivumisnopeuteen vaikuttaa suuresti myös ympäristöolosuhteet. Ympäristön lämpötila, suhteellinen kosteus ja ilman virtaus vaikuttavat siihen kuinka nopeasti betonin pinnalla oleva kosteus siirtyy pintaan. Ilman lämmitessä suhteellinen kosteus laskee, mikäli ilman kosteuspitoisuus pysyy samana. Tällöin ilman kyky vastaanottaa kosteutta kasvaa ja kuivuminen nopeutuu. Betoniulkoseinissä betonin lämpötilan kohotessa vesihöyryn osapaine rakenteen sisällä kasvaa, jolloin myös betonin vesihöyrynläpäisevyys kasvaa. /Pentti ja Hyypöläinen, s.45/

Rakenteen pinnoittaminen vaikuttaa myös kuivumiseen. BSW-elementin sisäkuoren tiivis pinnoittaminen aikaisin pidentää kuivumisaikaa, koska sisätilaan päin tapahtuva kuivuminen hidastuu oleellisesti. Ulkokuoren tiivis pinnoittaminen aiheuttaa kosteuden kerääntymistä pinnoitekerroksen alle, joka voi aiheuttaa pinnoitteen irtoamista ja lohkeilua. Pinnoitteen läpäistessä vesihöyryä hyvin, pääsee rakenne pinnoittamisenkin jälkeen kuivumaan ja ajan kanssa saavuttaa tasapainokosteuden ulkoilman kanssa. /Pentti ja Hyypyläinen, s.45/

### 2.5.3. Tuuletuksen vaikutus kuivumiseen

Tavallisesti ulkoseinärakenteisiin jätetään tuuletusrako julkisivupinnan taakse, jonka tehtävä on poistaa kosteutta rakenteesta ilmavirtausten avulla. Kosteuden poistuminen onnistuu, mikäli tuuletusrako on yhteydessä ulkoilmaan, suljetussa raossa ilmavirtaukset siirtävät kosteutta vain ilmaraon sisällä. /Björkholz, s.82/

Ilmavirtauksen mukana tuuletusraosta poistuva kosteus riippuu ilmavirran suuruudesta sekä ilman sitomasta kosteudesta. Ilmavirtaukseen tuuletusraossa vaikuttavat mm. tuulen paineesta ja termisestä konvektiosta aiheutuvat paine-erot tuuletuskanavistossa, kanaviston virtaustekniset ominaisuudet sekä ilman sisään- ja ulostulojärjestelyt. Tuuletusrako pystyy poistamaan kosteutta vain, jossa raossa olevan ilman kosteuspitoisuus on pienempi kuin haihduttavalla pinnalla eli tuuletusraon seinillä. Tuuletusraon kuivattava vaikutus edellyttää, että tuuletusraossa oleva ilma on lämpimämpää kuin rakoon tuleva ilma. Sisään virtaavan ilman ollessa lämpimämpää kuin raossa oleva ilma voi tuuletusraon kosteus jopa kasvaa. /Björkholz, s.46/

Lähteessä /Lehtinen et. al., s. 49-55/ on tutkittu laskennallisesti tuuletusurien kosteuden poistokykyä 3 m korkeille betonisandwich-elementille, jonka sisä- ja ulkokuoren paksuus oli 80 mm ( $w/c=0,6$ ) ja eristeenä uritettu mineraalivilla, jonka paksuus oli 140 mm (145 mm). Ilmastoparametreina oli ulkona  $-10\text{ °C}$  RH 90 % ja sisällä  $+21\text{ °C}$  RH 30 %. Tuuletusurien koko leveys oli 30 mm ja syvyys 15 mm, ja niiden jako vaihteli välillä k100...k400. Tuuletusurien ylä- ja alapäässä oli kokoojaurat kerroksittain eli 3 m:n välein. Tuuletuskanavissa käytettiin virtausnopeutena 0,005, 0,05 ja 0,2 m/s. Urille kokeiltiin sijaintia suoraan ulkokuoren betonia vasten sekä niin, että uran ja ulkokuoren sisäpinnan väliin jäi 10 mm eristettä. /Lehtinen et. al., s.49/

Kosteuden poistolle ja poistopotentialille lähteessä /Lehtinen et. al., s. 49-55/ lasketut tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 2.4). Kosteudenpoistopotentiali on saatu vähentämällä ulkoilman kosteussisällöstä tuuletusurassa lämmenneen ilman suurin kosteudensitomiskyky. Taulukoissa on ilmoitettu kosteudenpoistokyky seinän leveysmetriä kohden. Osa tuloksista on laskettu 3 metriä korkean seinämän sijasta 12 metriä korkealle seinämälle, joten näissä tuloksissa tulee ottaa huomioon, että kyseinen arvo vastaa 4 kerroksen kosteudenpoiston summaa. /Lehtinen et. al., s. 49/

Taulukko 2.4 tulosten mukaan rakenne kuivuu tuuletuksella merkittävästi diffuusiota nopeammin. Tuuletusurien tihentäminen lisää kosteudenpoistokykyä ja suurin kosteudenpoistokyky saadaan yhtenäisellä tuuletusuralla. Esimerkiksi 40 mm yhtenäisen tuuletusraon tapauksessa saavutetaan 200 mm jaolla sijoiteltuihin 15x30



mm<sup>2</sup> uriin nähden noin 18-kertainen tilavuusvirta samalla virtausnopeudella. Myös tuuletusurien sijoittaminen lämmöneristyskerroksen sisään parantaa kosteudenpoistokykyä. Tuuletuksen merkitys pienenee rakennuskosteuden kuivuttua, mutta tuo kuitenkin lisävarmuutta, koska mahdolliset vesivuodot kuivuvat nopeammin. /Lehtinen et. al., s.55/

**Taulukko 2.4** Stationääritilassa lasketut eri tuuletusratkaisujen kosteudenpoistopotentialit sekä lasketut poistuvat kosteusmäärät ulkolämpötilan ollessa -10 °C RH 90 % ja sisälämpötilan +21 °C RH 30 %. Merkinnoista de tarkoittaa tuuletusuran ja ulkokuoren sisäpinnan välistä etäisyyttä ja urakoko pystyuran syvyys x pystyuran leveys. Kursivoidulla ilmoitetuissa tapauksissa lukuarvo vastaa 4 kerrosta. Taulukko perustuu lähteeseen /Lehtinen et. al., s.54/

	Virtausnopeus urassa (m/s)	Urakoko (mm <sup>2</sup> )	de (mm)	Urajako (k/k)	Korkeus (m)	Laskettu max.poist (g/jm·d)	Laskettu poisto (g/jm·d)
Case01	0,005	15x30	0	100	3	1,3	0,6
Case02	0,05	15x30	0	100	3	12,9	2
Case03	<b>0,2</b>	<b>15x30</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>3</b>	<b>51,4</b>	<b>2,2</b>
Case04	0,05	15x30	0	200	3	6,5	1,7
Case05	0,2	15x30	0	200	3	25,8	2,1
Case06	0,05	15x30	0	400	3	3,2	1,2
Case07	0,2	15x30	0	400	3	12,9	1,8
Case08	0,05	15x30	0	200	12	6,3	3
Case09	0,02	15x30	0	200	12	25	6,8
Case10	0,05	25x50	0	200	3	20,5	2,1
Case11	<b>0,2</b>	<b>25x50</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>3</b>	<b>78,7</b>	<b>2,2</b>
Case12	0,05	25x50	0	200	12	19,6	6,1
Case13	0,2	25x50	0	200	12	78,5	8,3
Case14	0,005	15x30	10	100	3	2,2	0,6
Case15	0,05	15x30	10	100	3	22,4	2
Case16	0,2	15x30	35	200	3	26,6	1,7

Vertailun vuoksi taulukon (Taulukko 2.4) kosteuden poistoarvoille diffuusiolla tapahtuva kosteusvirta rakenteen läpi samoissa olosuhteissa on 0,35 g/m<sup>2</sup>d. Arviossa betonille käytettiin vesihöyrynläpäisevyytenä 1,815x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s ja villalle 1,815x10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s.

### 3. KOSTEUSTEKNISET LASKELMAT

Työssä tutkittiin laskennallisesti yhdeksän erilaisen rakennetyypin toimintaa, jotka täyttävät vuonna 2010 voimaan tulevat lämmöneristysmääräykset ja verrattiin niitä vuoden 2007 määräysten mukaisiin rakenteisiin. BSW-elementeissä oli sisäkuorena joko 80 mm paksu betoni, ulkokuorena oli 70 mm betoni. Eristeenä vaihteli tyypin mukaan mineraalivilla, EPS ja polyuretaani.

Pääpaino laskelmissa oli selvittää, poistuuko asetettu alkukosteus rakenteesta ja onko odotettavissa haitallista kosteuden kerääntymistä rakenteeseen käytön aikaisista kosteusrasituksista. Kosteuden poistumista tutkittiin tarkkailemalla ulkokuoren ja eristekerroksen keskimääräistä kosteuspitoisuutta sekä rakenteen eri rajapintojen läpi eri ajanhetkillä vaikuttavia kosteusvirtoja. Lisäksi tutkittiin suhteellisen kosteuden vaihtelua eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa. Laskennassa BSW-rakennetta tutkittiin erityyppisillä ja eri vahvuisilla eristeillä. Lisäksi rakenteen ympäristö olosuhteita ja julkisivun ilmansuuntaa vaihdeltiin. Tuuletuksen vaikutusta rakenteen kuivumiseen pyrittiin arvioimaan edellä mainituista tuloksista tehdyillä jatkolaskelmilla.

**Taulukko 3.1** Taulukossa on esitetty tiivistetysti tarkasteltavat rakenteet. Tarkempi periaatekuva rakenteesta on esitetty liitteessä A.

Rakenne	SK (mm)	Eriste	$\lambda$ (W/mK)	d (mm)	Uritus	UK (mm)	U (W/m <sup>2</sup> K)
US1	80	Villa	0.036	160	Kyllä	70	0.24
US2	80	EPS	0.036	160	Kyllä	70	0.24
US3	80	PUR	0.024	160	Ei	70	0.18
US4	80	PUR	0.024	240	Ei	70	0.11
US5a	80	EPS	0.031	180	Kyllä	70	0.17
US5b	80	EPS	0.031	180	Ei	70	0.17
US6	80	Villa	0.036	240	Kyllä	70	0.16
US7a	80	EPS	0.036	240	Kyllä	70	0.16
US7b	80	EPS	0.036	240	Ei	70	0.16
US8	80	Villa	0.036	350	Kyllä	70	0.11
US9	80	EPS	0.036	350	Ei	70	0.11

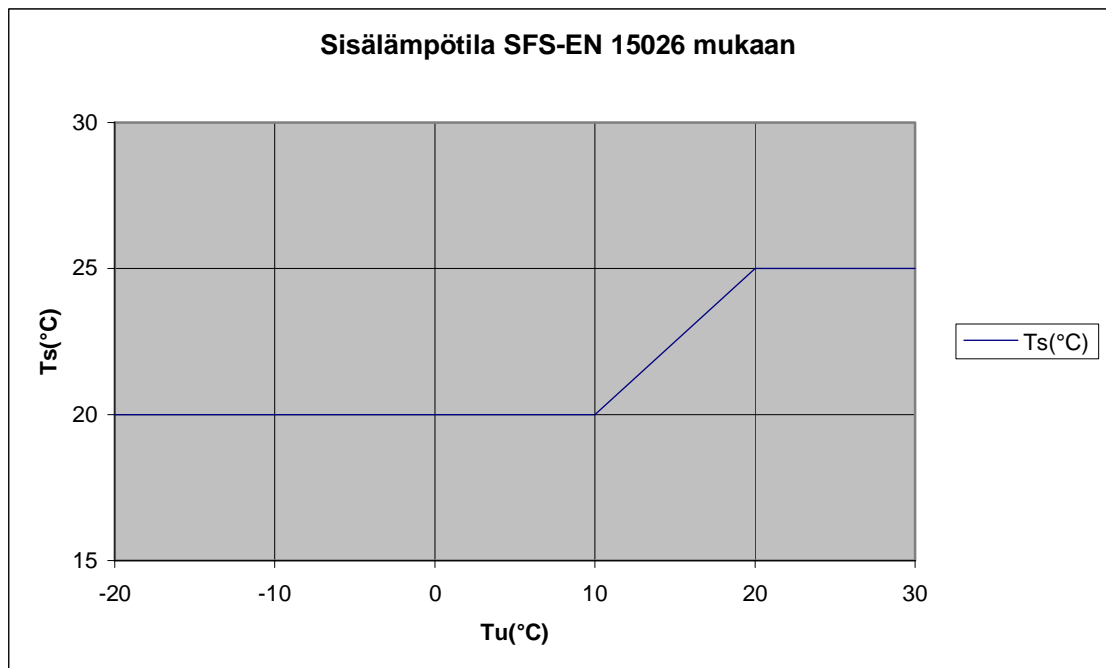
Taulukossa (Taulukko 3.1) on esitetty työssä tutkitut seinärakenteet. Rakennetyyppi US1 on tällä hetkellä yleisesti käytössä oleva rakenne ratkaisu. Rakennetyypit US5a, US5b, US6 sekä US7a ja US7b edustavat vuoden 2010 määräykset täyttäviä rakenteita. Vuoden 2010 lämmöneristysmääräyksiä on tarkoitus kiristää vielä entisestään vuonna 2012. Rakennetyypit US4, US8 ja US9 vastaavat tällä hetkellä vuodelle 2012 kaavailtua lämmöneristystasoa.

### 3.1. Laskentaohjelmista ja laskentaoletuksista

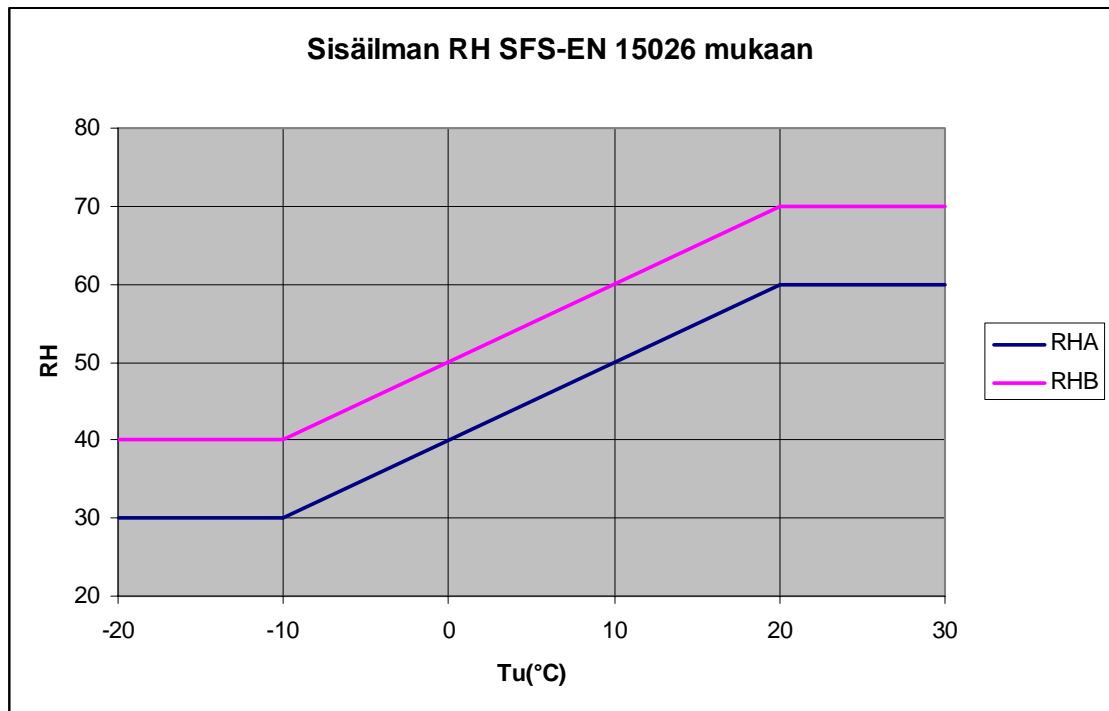
#### 3.1.1. Laskentaolosuhteet

Laskelmissa ilmastoparametreina käytettiin WUFI-ohjelman mukana tulevaa VTT:n keräämää Espoon ilmastoa sekä kondenssin kannalta todella rankkaa Norjan Karasjoen ilmastoa. Laskennassa ajettiin läpi 5 vuoden laskentajakso (1.10.2009–1.10.2014), jonka aikana tutkittiin rakennuskosteuden poistumista sekä mahdollisesti käytöstä kertyvää kosteutta ulkokuoren taakse.

Sisäilmastona käytettiin WUFI-ohjelmasta löytyvää EN 15026 mukaista ilmastoa suurella kosteusrasituksella. Tällöin sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus on kytketty toisiinsa kuvissa Kuva 3.1 ja Kuva 3.2 esitetyllä tavalla.

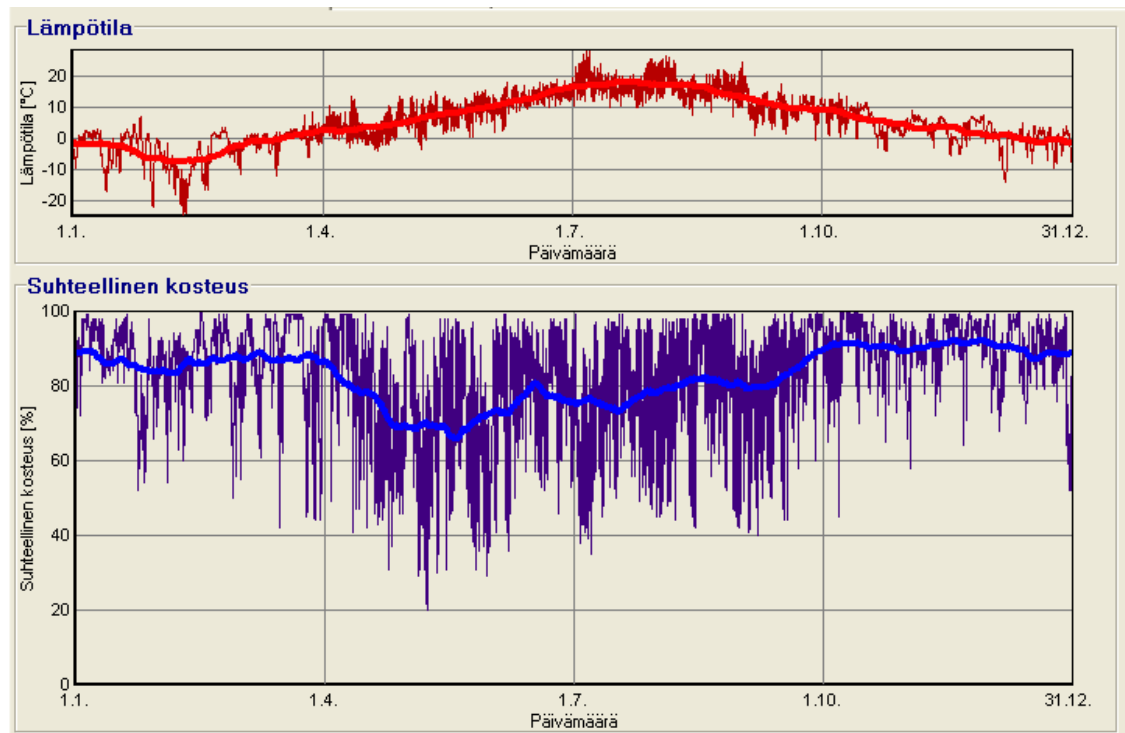


**Kuva 3.1** Kuvassa on esitetty ulkolämpötilan vaikutus sisälämpötilaan. Perustuu lähteeseen /13/

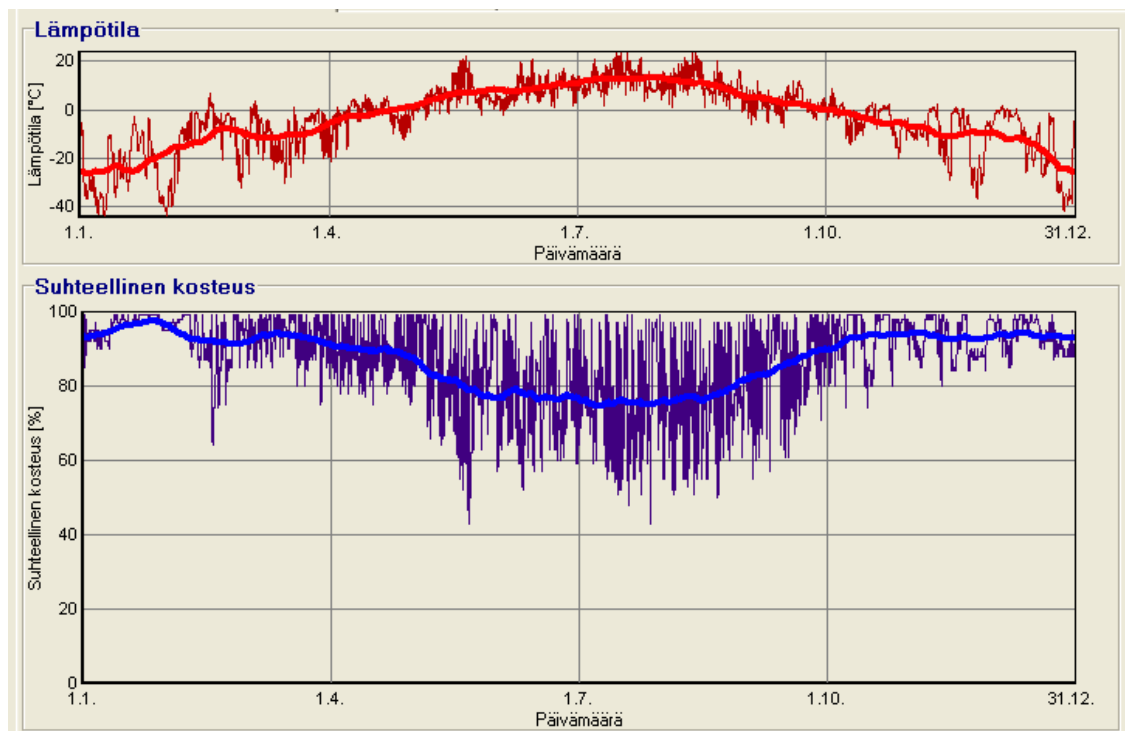


**Kuva 3.2** Kuvassa on esitetty ulkolämpötilan vaikutus sisäilman suhteelliseen kosteuteen. Laskennassa käytettiin suurta kosteusrasitusta, eli käyristä vaihtoehtoa  $RH_B$ . /13/

Ulkoilmastona käytettyjen Espoon ilmaston ja Norjan Karasjoen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut on esitetty kuvissa Kuva 3.3 ja Kuva 3.4. Vuotuinen sademäärä on Espoossa 652 mm/vuosi, joka on huomattavasti suurempi kuin Karasjoen 249 mm/vuosi. Toisaalta Karasjoen vuoden keskilämpötila  $-3,1\text{ °C}$  on alhaisempi kuin Espoon  $+5,5\text{ °C}$ . Lämpötiloista ja sademääristä johtuen Karasjoen ilmastoa voidaan pitää kondenssin tutkimisen kannalta kriittisempänä kuin Espoon ilmastoa. Toisaalta suuremman sademäärän ja lämpimämmän ilman johdosta homeen kasvulle otollisemmat olosuhteet ovat Espoossa.



**Kuva 3.3** Espoon ilmasto WUFI:ssa, VTT:n mittaama.



**Kuva 3.4** Karasjoen ilmasto WUFI:ssa, Norjan NBI / NTNU mittaama.

### 3.1.2. Käytetyt materiaaliarvot

Pääasiassa laskennassa käytetyt materiaaliarvot on poimittu WUFI:sta sekä Hagentoftin kirjasta "Introduction to building physics." Oheisessa taulukossa (Taulukko 3.2) on materiaalien ns. pääarvot ja seuraavissa alaluvuissa on käsitelty tarkemmin materiaaliakohtaisia lisätietoja, kuten kosteuskapasiteetti yms.

**Taulukko 3.2** Laskennassa käytetyt materiaaliarvot.

Materiaali	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Huok. (-)	$c_p$ (J/(kgK))	$\lambda$ (W/mK)	$m$ (-)
Betoni	2300	0.18	850	1.65	130
Villa	60	0.95	850	0.036	1.3
EPS	30	0.95	1500	0.036	50
EPS, "harmaa"	60	0.95	1500	0.031	33
PUR	40	0.95	1500	0.024	150

#### 3.1.2.1 Betoni

Edellä esitettyjen arvojen lisäksi betonille tietokonelaskelmissa huomioitiin betonin kosteuskapasiteetti, kapillaariset ominaisuudet absorptiossa ja uudelleen jakautumisessa sekä lämmönjohtavuuden muuttuminen kosteuspitoisuuden kasvaessa (Taulukko 3.3.) Lämmönjohtavuuden huomiointi syötettiin ohjelmiin lineaarisena siten, että kosteuspitoisuuden ollessa 0 kg/m<sup>3</sup> lämmönjohtavuus oli 1,65 W/mK ja kosteuspitoisuuden ollessa 180 kg/m<sup>3</sup> lämmönjohtavuus oli 2,602 W/mK.

**Taulukko 3.3** Betonin kosteuskapasiteetti sekä kapillaariset ominaisuudet. Suhteellisen kosteuden arvoa 0.97 vastaava kosteuskapasiteetti 123 kg/m<sup>3</sup> on lisätty numeerisista syistä. DWS (liquid transport coefficient for suction) tarkoittaa veden kapillaarista imeytymistä, kun pinta josta imetään, on täysin märkä. DWW (liquid transport coefficient for redistribution) tarkoittaa kapillaarisia ominaisuuksia uudelleen jakaantumisvaiheessa, kun uutta vettä ei enää imeydy rakenteeseen. Perustuu lähteeseen [WUFI Online Help]

Kosteuskapasiteetti		Kapillaariset ominaisuudet		
RH	$w$ (kg/m <sup>3</sup> )	$w$ (kg/m <sup>3</sup> )	DWS (m <sup>2</sup> /s)	DWW (m <sup>2</sup> /s)
0	0	0	0	0
0,05	27	72	7,40E-11	7,40E-12
0,1	32	85	2,50E-10	2,50E-11
0,15	34	100	1,00E-09	1,00E-10
0,2	35	118	1,20E-09	1,30E-10
0,3	37	150	6,76E-08	6,76E-09
0,4	40			
0,5	48			
0,6	58			
0,7	72			
0,8	85			
0,9	100			
0,95	118			
0,97	123			
1	150			

### 3.1.2.2 Eristeet

Eristemateriaalien arvot poimittiin pääasiassa WUFI:n mukana tulevasta kirjastosta (Taulukko 3.4). Kirjastosta löytyviä materiaaliarvoja täydennettiin lähteen /Hagentoft/ mukaan. Numeerisista syistä materiaalien 100 % suhteellista kosteutta vastaavat kosteudet jouduttiin laskennassa muuttamaan arvoon  $45 \text{ kg/m}^3$ . Todellisilla kosteuskapasiteeteilla laskentaan alkoi tulla konvergoituvuutta joissain olosuhteissa ja myös ajoittain materiaalin kosteuspitoisuus ylitti todellisilla arvoilla laskettaessa taulukon mukaisen maksimin.

Kosteuskapasiteetin korjauksen vuoksi myös EPS:n ja PUR:n kosteuskapasiteetille annettiin arvot 98 % suhteelliseen kosteuteen kondenssitarkasteluja helpottamaan, koska 97...98 % suhteellisen kosteuden paikkeilla materiaali muuttuu hygroskooppiselta alueelta kapillaariselle alueelle. Ns. harmaalle EPS:lle käytettiin normaalin EPS:n kosteuskapasiteetteja paremman tiedon puuttuessa.

**Taulukko 3.4** Taulukossa on esitetty laskennassa käytetyt eristeiden kosteuskapasiteetit. 100 % suhteellisen kosteuden kohdalla suluissa annettu arvo on todellinen ja  $45 \text{ kg/m}^3$  laskennassa käytetty.

Mineraalivilla		EPS		PUR	
RH	w (kg/m <sup>3</sup> )	RH	w (kg/m <sup>3</sup> )	RH	w (kg/m <sup>3</sup> )
0	0	0	0	0	0
0,33	0,82	0,35	0,12	0,35	0,14
0,55	0,88	0,5	0,16	0,5	0,16
0,75	0,95	0,7	0,16	0,7	0,19
0,83	1,2	0,8	0,18	0,8	0,21
0,93	2,9	0,9	0,27	0,9	0,28
0,97	3,3	0,95	0,38	0,95	0,36
1	45 (4,1)	0,98	0,45	0,98	0,43
		1	45 (0,6)	1	45 (0,92)

### 3.1.3. Rakenteiden mallinnus ja käytetyt ohjelmat

Kaikki rakenteet mallinnettiin ensin WUFI:lla ajamalla viiden vuoden laskentajakso käyttämällä kohdassa 3.1.1 mainittuja ilmastoparametreja. Alkuolosuhteina laskennassa käytettiin läpi rakenteen olevaa  $20 \text{ °C}$  lämpötilaa sekä 90 % suhteellista kosteutta. Ympäristöolosuhteista otettiin huomioon ilmansuunnasta aiheutuva saderasitus sekä auringonpaiste. Ulkokuoren pinnalla ei oletettu olevan mitään pinnoitetta, joka hidastaisi sadeveden imeytymistä tai tehostaisi auringon säteilyn vaikutusta. Aika-askeleena laskennassa käytettiin yhtä tuntia.

Tuuletuksen vaikutusta arvioitiin luvussa 2 esitetyllä Gertisin menetelmällä. Käsilaskennalle tarvittavat lähtötiedot laskettiin WUFI:lla lisäämällä monitorointi pisteet ulkokuoren ja eristeen rajapintaan sekä 27 mm ulkokuoresta sisäänpäin. Monitoripiste keräsi laskentajakson ajalta kullakin ajan hetkellä pisteessä vallinneen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden. Monitoripisteistä kerättyjen tietojen avulla laskettiin tuuletuksen poistama kosteus tunnin välein koko laskentajakson läpi. Tätä laskettua tuuleutusta käytettiin jokaisen aika-askeleen keskiarvona (laskennassa aika-

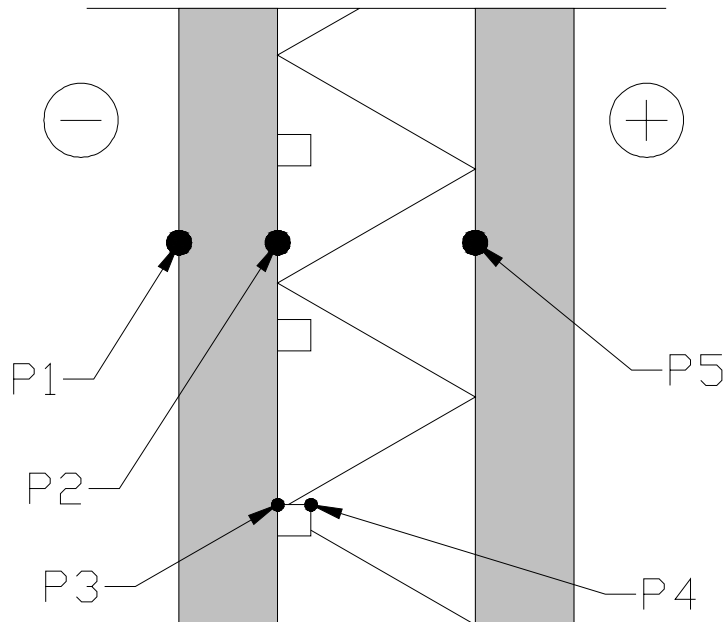
askel = 1 h) ja näitä tunnin jaksoja yhteen laskemalla saatiin kuukausi ja vuositason poistuvat kosteusmäärät.

Tuuletustarkasteluissa urituksena käytettiin 25 mm leveitä ja 27 mm syviä uria, joiden k-jako oli 150 millimetriä. Virtausnopeutena tuuletusurissa käsilaskennassa käytettiin 0,01 m/s. Comsol ohjelmalla tehtiin lisäksi tarkentavia laskelmia luonnollisen konvektion aikaansaamista virtauksista. Tarkemmin virtauslaskennan mallinnus ja reunaehdot on käsitelty liitteessä B.

WUFI:lla laskelmia tehtiin myös siten, että rakenteen ilmansuuntaa vaihdettiin, jolloin voitiin tutkia auringon säteilyn ja viistosateen vaikutusta kosteuskäyttäytymiseen. WUFI:ssa auringonsäteily oli annettu säätiedostossa, joiden perusteella WUFI laski säteilyn vaikutuksen pintaan rakenteen ilmansuunnan, kallistuskulman ja pinnan emissiokertoimen avulla. Viistosateen intensiteetin WUFI laski myös säätiedoston perusteella. Lisäksi laskettiin ns. nollatapaus, jossa sekä auringonsäteily että viistosade suljettiin pois, mutta kuitenkin rakenteessa pidettiin sama alkukosteus kuin muissakin tapauksissa.

#### 3.1.4. Laskentaperiaatteet

Laskennassa tutkittiin rakenteen kosteuspitoisuuksien käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Pääsääntöisesti tutkittiin rakenteen kuivumista ja asettumista tasapainoon ympäröivien olosuhteiden kanssa siten, että alkutilanteessa koko rakenteen läpi vallitsi 90 % suhteellinen kosteus. Lisäksi villaeristeisillä rakennetyypeillä laskettiin myös tapaus, jossa villa oli alkutilanteessa päässyt kastumaan esim. rakentamisen aikaisen sateen vaikutuksesta siten, että suhteellinen kosteus villassa oli 100 %.



**Kuva 3.5** Kuvassa on esitetty laskennassa tarkastellut pisteet. Kosteusvirrat on laskettu WUFI:lla pisteissä P1, P2 ja P5. Suhteellista kosteutta ja kondenssia on tutkittu pisteessä P2. Tuuletusuran seinämän lämpötila on laskettu pisteiden P3 ja P4 keskiarvona ja uran pinnalla vallitseva kosteuspitoisuus pisteestä P3 (P2).



Oheisessa kuvassa (Kuva 3.5) on esitetty laskennassa tarkasteltuja pisteitä. WUFI:sta saadaan suoraan tuloksena kosteusvirrat pisteissä P1, P2 ja P5. Kondenssia on tutkittu pisteessä P2 asettamalla monitorointi piste tähän. Kondenssin tulkittiin syntyvän tilanteissa, joissa suhteellinen kosteus ylitti 97..98 % arvon. Tuuletusuran seinämän lämpötila on laskettu pisteiden P3 ja P4 keskiarvona ja uran pinnan kosteus pitoisuutena on käytetty pisteestä P3 saatua kosteusmäärää. Lämpötilat laskettiin WUFI:lla, joten itse asiassa pisteet P3 ja P4 kuvastavat lämpötilaa tuulettumattomassa rakenteessa tietyllä etäisyydellä ulkokuoren sisäpinnasta.

Tuuletuksen vaikutusta arvioitaessa Gertisin menetelmällä, villaeristeiset rakennetyypit käsiteltiin, kuten teoria luvuissa on esitetty. Uretaani- ja EPS-eristeille sen sijaan Gertisin menetelmää sovellettiin hieman. Tämä tehtiin, koska EPS:llä ja uretaanilla on villaa huomattavasti korkeampi vesihöyrynvastus. Näin ollen tuuletusurassa eristeen pinnalla ei EPS:n ja uretaanin tapauksessa ole välttämättä kosteutta poistettavaksi asti, vaan käytännössä kosteutta poistuu vain betonin pinnalta. Tätä vaikutusta arvioitiin sillä, että uran kosteuden poistokykyä laskevassa kaavassa käytettiin uran pinta-alana yhtä neljäsosaa uran todellisesta pinta-alasta (vrt. kohta 2.4.3.2).

$$G_{z=l} = \frac{v \cdot \rho \cdot \frac{1}{4} A}{4} \cdot (a_{(l)} - a_{(u)}) \quad (72)$$

## 3.2. Kosteusteknisten laskelmien tulokset

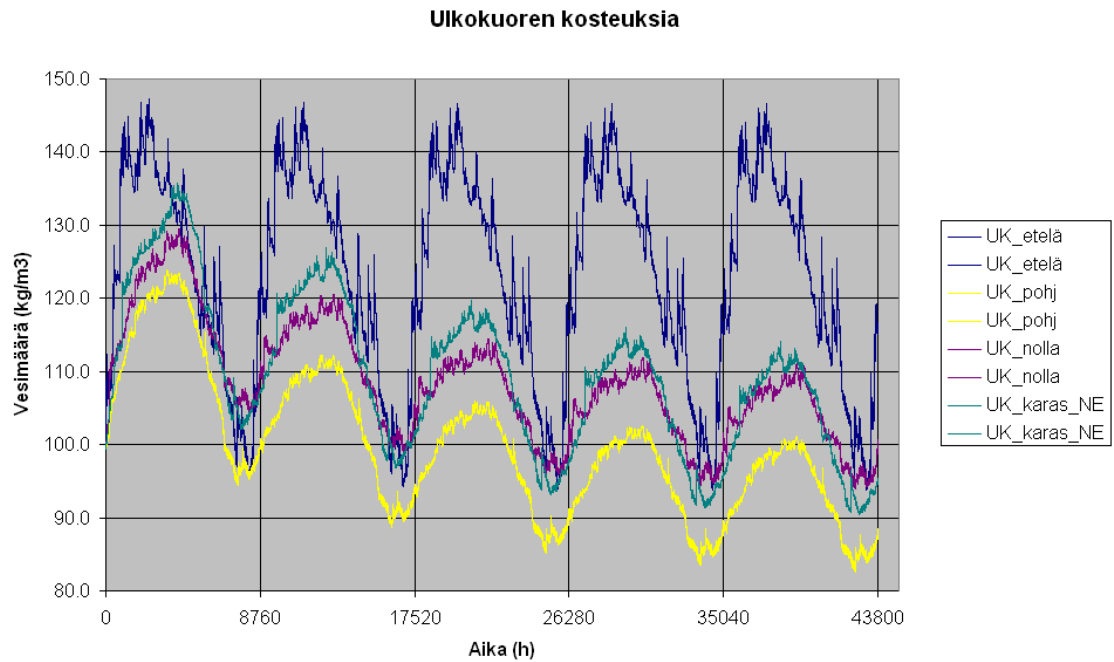
### 3.2.1. Rakennetyyppi US1

Rakennetyyppi US1 edustaa nykyisin yleisesti käytössä olevaa ratkaisua, jossa eristeenä on uritettu mineraalivilla. Laskelmat on kuitenkin tehty siten, että uritusta ei ole huomioitu muuten kuin erillisessä tuulettuvuustarkastelussa. Oheinen kuva esittää ulkokuoren kosteuspitoisuuden vaihtelua WUFI:lla tehdyn laskentajakson aikana. Kuvasta näkyy, että julkisivun ollessa etelään Espoossa, olivat kosteuspitoisuudet suurimmat. Kuivimmillaan ulkokuori pysyi julkisivun ollessa pohjoiseen, ollen n. 10 kg/m<sup>3</sup> kuivempi kuin ns. nolla-julkisivu.

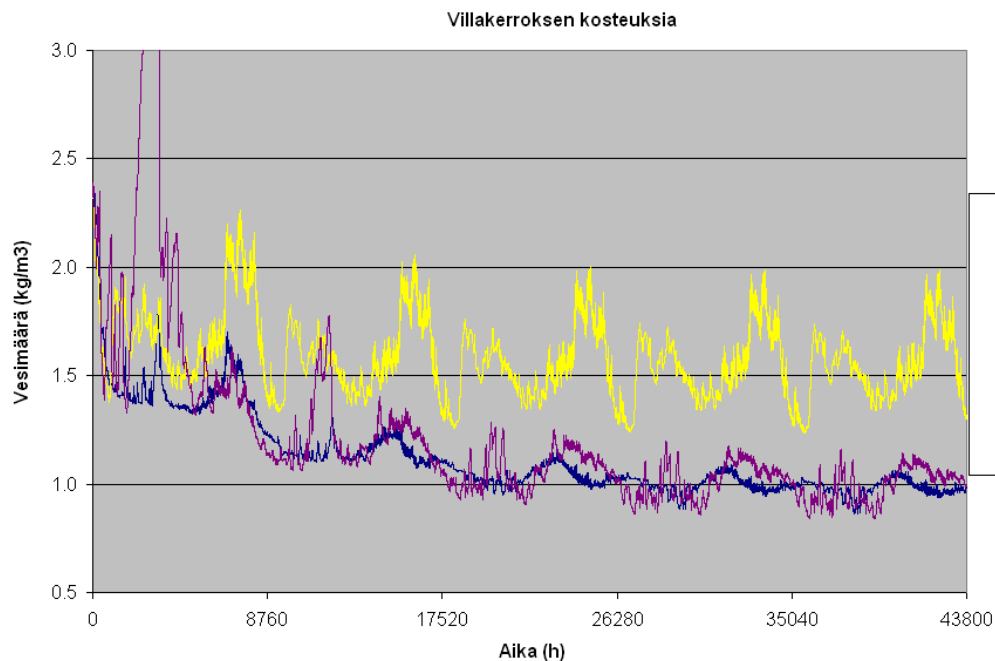
Ulkokuoren kosteuksista voidaan todeta, että Espoossa etelään suunnattu julkisivu keräsi huomattavasti enemmän kosteutta kuin muut julkisivut. Osa tästä selittyy sillä, että tutkituista tapauksista suurin saderasitus ulkokuorelle oli juuri kyseisellä tapauksella. Julkisivun ollessa etelään, oli ulkokuori kuivimmillaan syyskuun alussa. Tämän jälkeen kosteus lähti nousemaan voimakkaasti syyssateiden johdosta ja saavutti suurimman arvonsa tammikuun puolelsvälissä.

Villan kosteuksia laskentajaksoilla on esitetty kuvassa (Kuva 3.7). Sekä Espoon pohjois- että Karasjoen koillisjulkisivu kuivuivat alkutilanteesta laskentajakson loppua kohden. Sen sijaan Espoon eteläjulkisivulla villan vesimäärä alkutilanteesta ei juuri muuttunut keskimääräisen kosteuden jäädessä tasolla 1,5..1,6 kg/m<sup>3</sup> (n. RH85), kun se

muilla julkisivuilla asettuu  $1 \text{ kg/m}^3$  (n. RH80) tasolle. Kolmannen vuoden jälkeen villassa ei ollut havaittavissa sanottavaa kuivumista koillis- eikä pohjoisjulkisivulla.

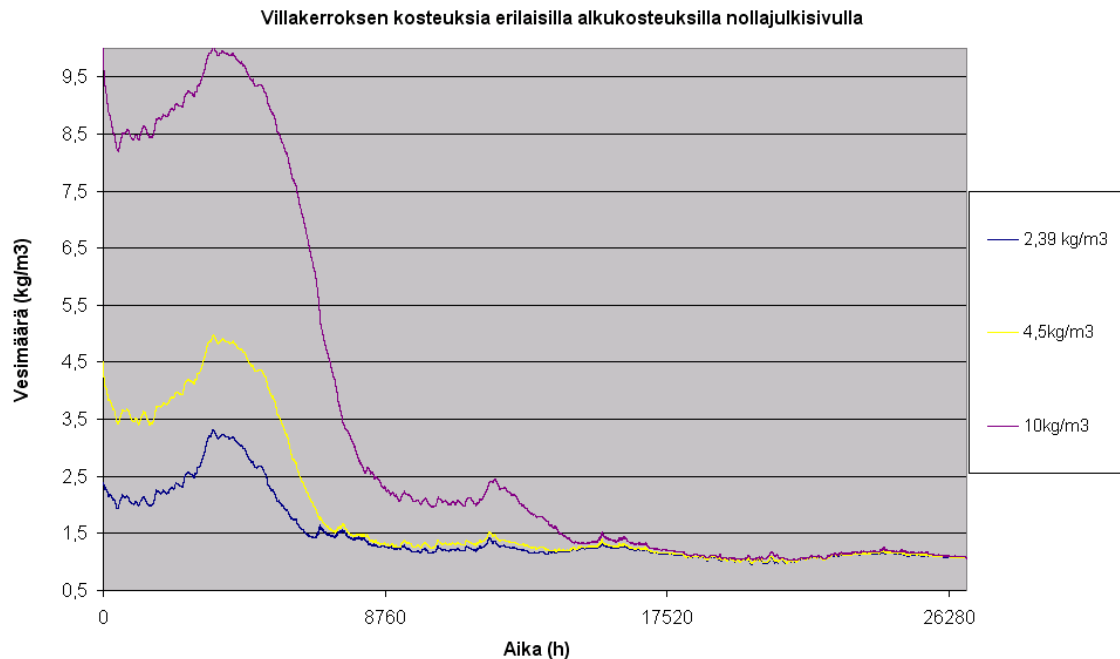


**Kuva 3.6** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US1 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.



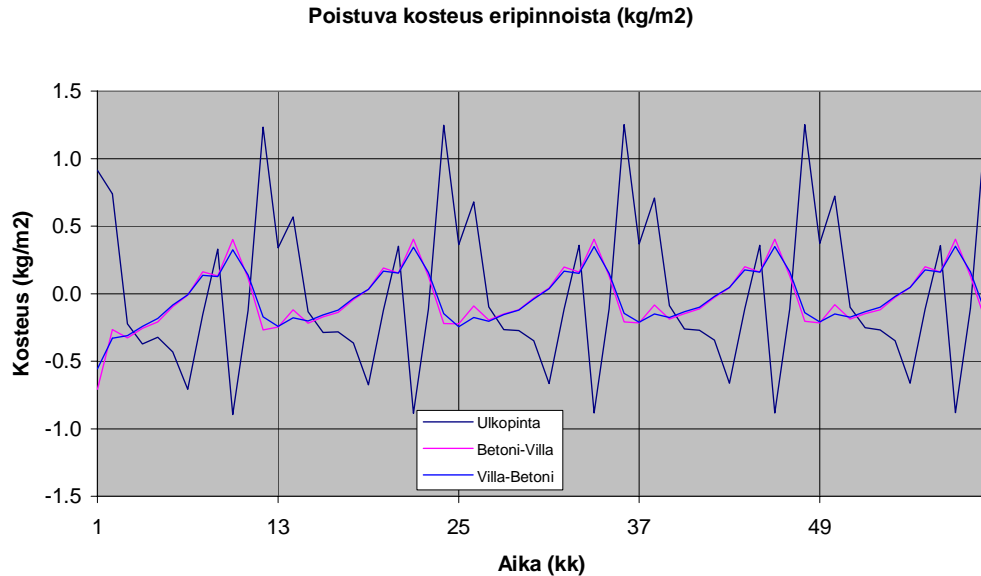
**Kuva 3.7** Kuvassa on esitetty villan keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) julkisivun ollessa pohjoiseen ja etelään Espoossa sekä koilliseen Karasjoella, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Nollajulkisivulla kokeiltiin lisäksi tilannetta, jossa eristetilassa oli  $2,39 \text{ kg/m}^3$  (RH90) sijasta  $4,5 \text{ kg/m}^3$  (RH100) ja  $10 \text{ kg/m}^3$  vettä. Tämän tarkastelun tuloksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.8).  $4,5 \text{ kg/m}^3$  kosteus tasoittui normaaliin alkukosteuteen vajaassa vuodessa ja  $10 \text{ kg/m}^3$  saavutti saman tason normaalin alkukosteuden kanssa noin puolentoista vuoden kuluttua laskennan alkuhetkestä.



**Kuva 3.8** Kuvassa on esitetty villakerroksen keskimääräisiä kosteuksia nollajulkisivulla, kun alkukosteutena on käytetty normaalia suurempia kosteuksia. Betonissa alkukosteudet olivat samat kuin muissakin laskennoissa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Tarkemmin rakenteen eri rajapinnoissa tapahtuvia kosteusvirtoja on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.9). Kuvasta nähdään, että ulospäin suuntautuva kosteusvirta (miinusmerkkinen) oli lähes yhtä suuri sisäänpäin suuntautuvan kosteusvirran kanssa. Ulkopinnassa oli suurimmat vaihtelut vuoden ajan mukaan poistuvan ja kerääntyvän kosteuden määrässä. Tämä johtui ulkopintaan suoraan vaikuttavasta auringon säteilystä sekä viistosateesta. Viistosateet saivat aikaan runsasta kosteusvirtaa pinnasta rakenteen sisäänpäin ja toisaalta kesän helteet voimakasta kuivumista ulkopinnassa. Kuitenkin runsas kuivuminen ja kastuminen ovat vuoden sisällä suurin piirtein tasapainossa. Rakenteen sisällä kuivuvan ja kerääntyvän kosteuden heilahtelut olivat huomattavasti pienemmät kuin ulkopinnassa, mutta kuitenkin käyristä ei voitu havaita selvää kuivumista eikä kastumista rakenteen sisällä.



**Kuva 3.9** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, kun tuulettusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Tuulettumattomana eteläjulkisivulla rakenteesta kuivuva ja rakenteeseen sateena tuleva vesimäärä olivat lähes yhtä suuret, jolloin vuositason nettokuivuminen jää pieneksi. Ensimmäisenä vuotena rakenteen sisemmistä kerroksista virtasi rakennuskosteutta yli kilo neliöltä ulospäin, joka näkyi normaalia suurempana kosteuden poistumana ulkokuoren pinnasta seuraavana vuonna, kun sama kosteus ei ehti kulkeutua ensimmäisen vuoden aikana ulkokuoren lävitse. Kaiken kaikkiaan rakenne kuivui tuulettumattomanakin tasaantumisen jälkeen n. 30 g/m<sup>2</sup> vuodessa kaikissa rajapinnoissa. Taulukosta (Taulukko 3.5) havaitaan myös ulkopintaan aiheutuva sateen ja auringon merkittävä vaikutus, tulevaa ja poistuvaa kosteutta oli lähes 22 kg/m<sup>2</sup>/vuosi.

**Taulukko 3.5** Taulukossa on esitetty vuosittain eri rajapinnoissa tapahtuva kosteuden kerääntyminen ja tiivistyminen (kg/m<sup>2</sup>/vuosi). Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - Villa (kg/m <sup>2</sup> )			Villa - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-21.933	21.915	-0.018	2.313	-3.646	-1.332	-1.320	0.163	-1.157
<b>2 vuosi</b>	-22.007	21.650	-0.357	2.437	-2.690	-0.253	-0.433	0.198	-0.235
<b>3 vuosi</b>	-21.882	21.770	-0.112	2.418	-2.505	-0.087	-0.433	0.198	-0.235
<b>4 vuosi</b>	-21.847	21.803	-0.045	2.414	-2.456	-0.042	-0.232	0.191	-0.041
<b>5 vuosi</b>	-21.842	21.810	-0.032	2.413	-2.448	-0.035	-0.222	0.191	-0.032
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-0.564</b>			<b>-1.750</b>			<b>-1.699</b>

Oheisessa taulukossa (Taulukko 3.6) on esitetty tuuletusurien kautta poistuvan kosteuden määrä etelään suunnatun julkisivun sekä nolla-julkisivun tapauksessa. Tuloksista havaitaan, että eteläisellä julkisivulla tuuletuksen kuivattama kosteus määrä oli huomattavasti suurempi kuin nollajulkisivulla (=ei viistosadetta eikä auringon

paistetta). Lisäksi nollajulkisivulla havaitaan tuuletuksen kautta poistuvan kosteuden pienenevän vuosien kuluessa. Laskennassa urituksena on käytetty k150 jaolla 25 x 27 mm uria (25 x 33 mm, oletettu 6 mm painuma), joissa virtausnopeutena on ollut 0,01 m/s.

**Taulukko 3.6** Ohessa on esitetty tuuletusurituksen poistama kosteus Gertisin menetelmällä arvioituna eteläisellä ja nollajulkisivulla. Laskennassa virtausnopeutena oli 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150. Laskennassa lämpötilat ja suhteelliset kosteudet on saatu WUFI:n tuloksista tunnin välein laskentajakson ajalta. Tuuletuksen mukana poistuva kosteus on laskettu näiden tulosten perusteella joka tunnille erikseen ja vuoden sekä kuukausitason poistuvat kosteudet on laskettu summaamalla näitä tunnin jaksoja tarvittava määrä.

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	73,2	61,0	102,7	80,3	49,4	129,4	496,1
2.vuosi	72,4	59,6	100,0	77,5	47,5	127,2	484,2
3.vuosi	72,1	59,2	99,2	76,6	47,0	126,0	480,0
4.vuosi	72,1	59,0	99,0	76,4	46,9	125,6	478,9
5.vuosi	72,1	59,0	99,0	76,3	46,9	125,6	478,8
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	32,7	24,0	43,1	26,9	17,7	58,3	202,8
2.vuosi	31,2	21,0	37,9	21,6	14,3	50,6	176,6
3.vuosi	29,3	18,5	33,6	16,8	12,2	43,0	153,4
4.vuosi	28,4	17,4	31,0	14,3	11,1	37,9	140,1
5.vuosi	28,0	16,9	30,0	13,4	10,7	35,8	134,8

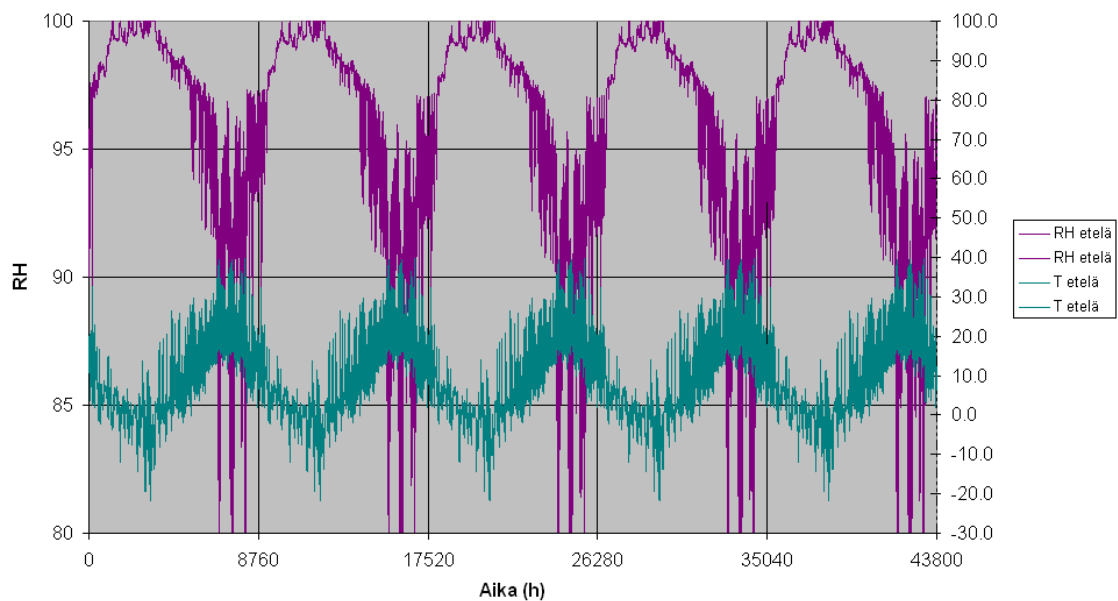
Ero tuuletuksen kuivattavassa vaikutuksessa johtuu sekä auringon lämmittävästä vaikutuksesta että uran pinnassa olevasta kosteusmäärästä. Auringon lämpösäteilyn vaikutuksesta urassa ilma lämpenee enemmän, jolloin sen kyky sitoa kosteutta paranee. Toisaalta ilma ei voi sitoa enempää kosteutta kuin uran pinnasta on tarjolla. Tämän vuoksi nollajulkisivulla urituksen kautta poistuva kosteus pienenee ajan kuluessa, koska rakenteen kuivumisen johdosta poistettavaa kosteutta on yhä vähemmän kun taas eteläisen julkisivun tapauksessa ilman tuuletusta ei kuivumista juuri tapahtunut. Verrattuna diffuusiolla rakenteen läpi stationääritilassa tapahtuviin kosteusvirtoihin nollajulkisivulla (Taulukko 3.7), voidaan tuuletuksen todeta tehostavan kuivumista, etenkin kesäaikaan.

**Taulukko 3.7** Taulukossa on esitetty vertailuvuoksi erilaisissa stationääritilanteissa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa (g/m<sup>2</sup>kk). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ja villalle  $1,82 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

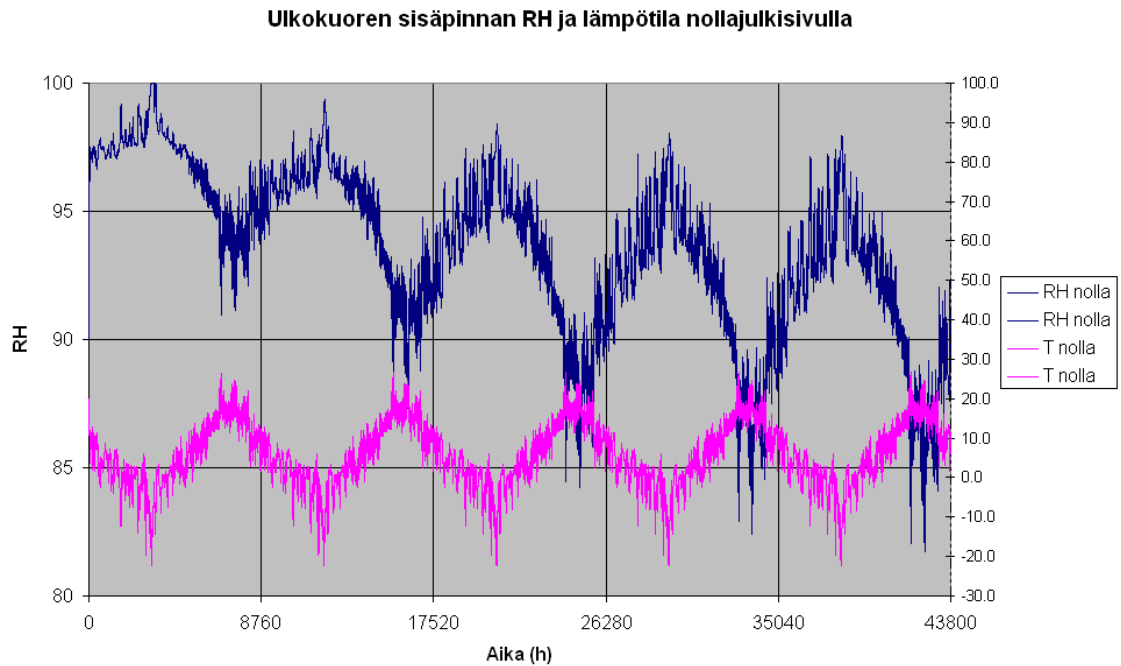
	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Ulko-olosuht	7,74	0,69	12,37	0,79	17,43	0,74	16,54	0,81	10,21	0,82	0,15	0,87
g (g/m <sup>2</sup> kk)	13,55		9,09		10,69		7,71		8,25		93,38	

Urien kautta tuuletuksen avulla poistuva kosteus määrä riippuu uranmuodosta, urajaosta ja etenkin virtausnopeudesta urissa sekä uraa ympäröivän materiaalin vesihöyryn vastuksesta. Tiivis materiaali ei kykene luovuttamaan kosteutta uriin sitä vauhtia kun ilmavirta sitä poistaisi. Esimerkiksi, jos nollajulkisivulla samalla urituksella virtausnopeus olisikin 0,005 m/s, ensimmäisenä vuonna poistuisi kosteutta 100 g/m<sup>2</sup>. Jos virtausnopeutena urassa olisi 0,05 m/s, ensimmäisenä vuonna urituksen kautta poistuisi kosteutta 1014 g/m<sup>2</sup>. Jos virtausnopeus olisi sama 0,01 m/s, mutta urana olisikin 30 x 30 mm<sup>2</sup> k200 jaolla, poistuisi ensimmäisenä vuonna kosteutta 196 g/m<sup>2</sup>. Tarkemmin erilaisten uritusten vaikutusta lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen on tutkittu esimerkiksi lähteissä /Salonvaara/ ja /Lehtinen et. al./.

**Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla**



**Kuva 3.10** Kuvassa on esitetty suhteellinen kosteus ja lämpötila ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa (piste P2), kun julkisivu on suunnattu etelään Espoossa ja tuuletuksista ei ole huomioitu. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.

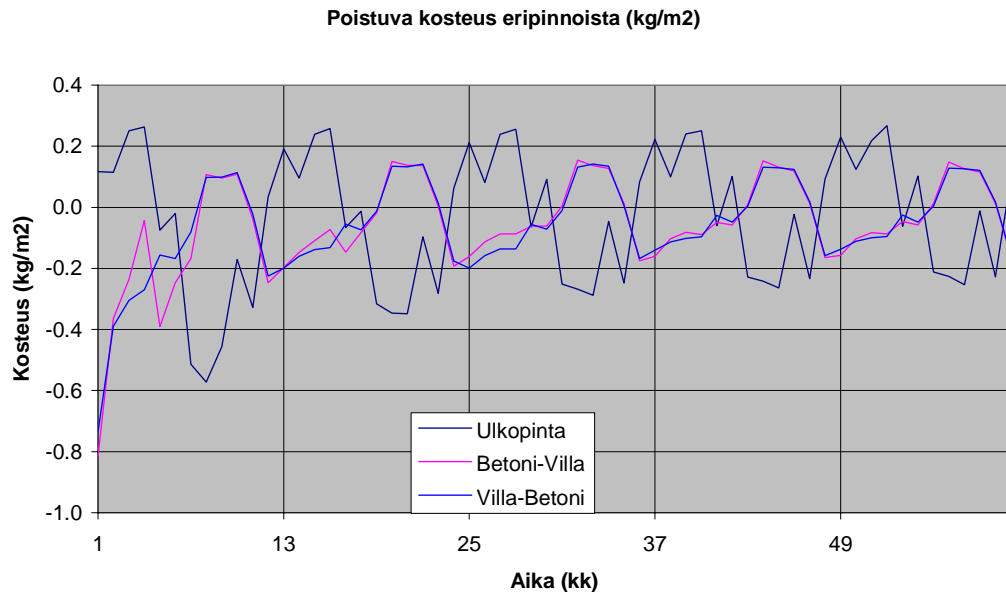


**Kuva 3.11** Kuvassa on esitetty suhteellinen kosteus ja lämpötila ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa (piste P2) Espoon nollajulkisivulle ilman tuuletusta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Oheisessa kuvassa (Kuva 3.10) näkyy suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitys laskentajakson aikana ulkokuoren sisäpinnassa eteläisellä julkisivulla. Kuvasta nähdään, että suhteellinen kosteus oli lähes 100 % koko talven ajan. Nollajulkisivun tapauksessa (Kuva 3.11) suhteellinen kosteus osoittaa laskevaa trendiä ja vuosittainen maksimiarvo asettuu 97 % tienoille. Espoon sääolosuhteilla ei siis tuulettamattomalle rakenteelle ole odotettavissa kondenssia ja eteläisen julkisivun tapauksessa suhteellisen kosteuden korkeat arvot johtuvat sadeveden tunkeutumisesta rajapintaan eikä kondenssista.

### 3.2.1.1 US1 Karasjoen ilmastossa

Karasjoen ilmasto on huomattavasti kylmempi kuin Espoossa, esim. vuoden keskilämpötila Espoossa on +5,5 °C kun se Karasjoella on -3,1 °C. Oheisessa kuvassa on esitetty eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden poistumista. Käyrissä on laskettu yhteen sekä kapillaarisesti että diffuusion kautta tapahtuva kosteuden siirtyminen. Kosteuskäyrät ovat pääasiassa negatiivisella puolella, mikä tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa kosteusvirtaa. Tätä enteili jo Kuva 3.6.



**Kuva 3.12** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Ulkopinnasta vuosittain poistuva kosteus pieneni kuten kuivuvalla rakenteella pitääkin kosteuden vähentyessä. Kerääntyvä kosteus sen sijaan pysyi vuodesta toiseen suurin piirtein samalla tasolla. Tarkemmin eri pinnoista poistuvat kosteudet vuosittain on esitetty taulukossa (Taulukko 3.8). Jos taulukkoa verrataan Espoon vastaavaan, voidaan heti havaita ulkokuoreen kohdistuvan saderasituksen olevan oleellisesti pienempi. Siinä missä Karasjoella normaali vuotuinen sademäärä on 249 mm/vuosi, niin se Espoossa on 652 mm/a. Viistosateen määrä WUFI:n ilmastoanalyysin mukaan vielä korostaa eroa: Espoossa vuotuinen viistosade määrä on 300 mm/vuosi, kun taas Karasjoella se on hieman yli 16 mm/vuosi.

**Taulukko 3.8** Taulukossa on esitetty Karasjoen ilmastossa koilliseen suunnatun julkisivun kosteusvirtoja eri rajapinnoissa. Miinusmerkkinen lukema tarkoittaa virtaa sisältä ulospäin ja plusmerkkinen ulkoa sisälle päin.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - Villa (kg/m <sup>2</sup> )			Villa - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht
<b>1 vuosi</b>	-1.805	0.446	-1.358	0.660	-2.897	-2.237	-2.034	-0.008	-2.042
<b>2 vuosi</b>	-1.068	0.446	-0.622	0.757	-1.299	-0.542	-0.539	0.014	-0.525
<b>3 vuosi</b>	-0.650	0.446	-0.203	0.737	-1.050	-0.313	-0.538	0.014	-0.525
<b>4 vuosi</b>	-0.492	0.446	-0.045	0.706	-0.990	-0.284	-0.288	0.008	-0.280
<b>5 vuosi</b>	-0.404	0.446	0.043	0.683	-0.962	-0.279	-0.283	0.007	-0.276
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-2.187</b>			<b>-3.655</b>			<b>-3.648</b>

Oheisessa taulukossa (Taulukko 3.9) on esitetty Karasjoen koillisjulkisivulle tuuletuksen aiheuttama kuivattava vaikutus. Urituksen poistama kosteus jäi selvästi pienemmäksi kuin Espoon eteläisellä julkisivulla, mutta on kuitenkin hieman suurempi kuin nollajulkisivulla. Urituksen kosteudenpoistoa tarkasteltaessa käytettiin samoja oletuksia kuin Espoon eteläiselle julkisivulle.

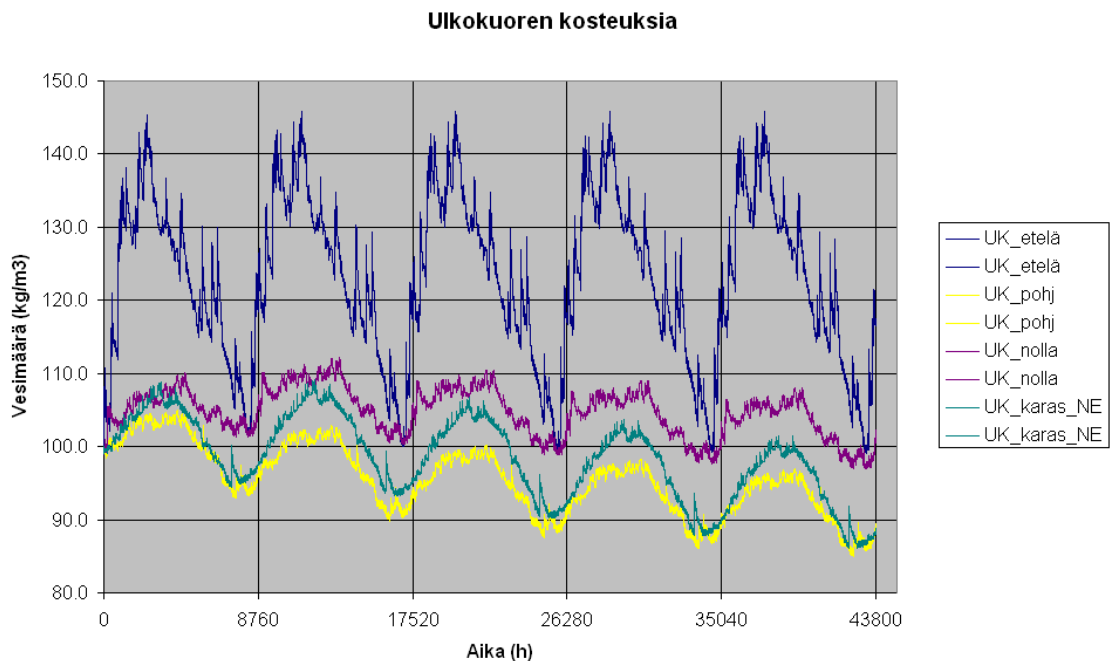


**Taulukko 3.9** Taulukossa on esitetty Gertsin menetelmällä arvioitu tuuletusurituksen poistama kosteus Karasjoen ilmastossa koillisella julkisivulla virtausnopeuden ollessa 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150.

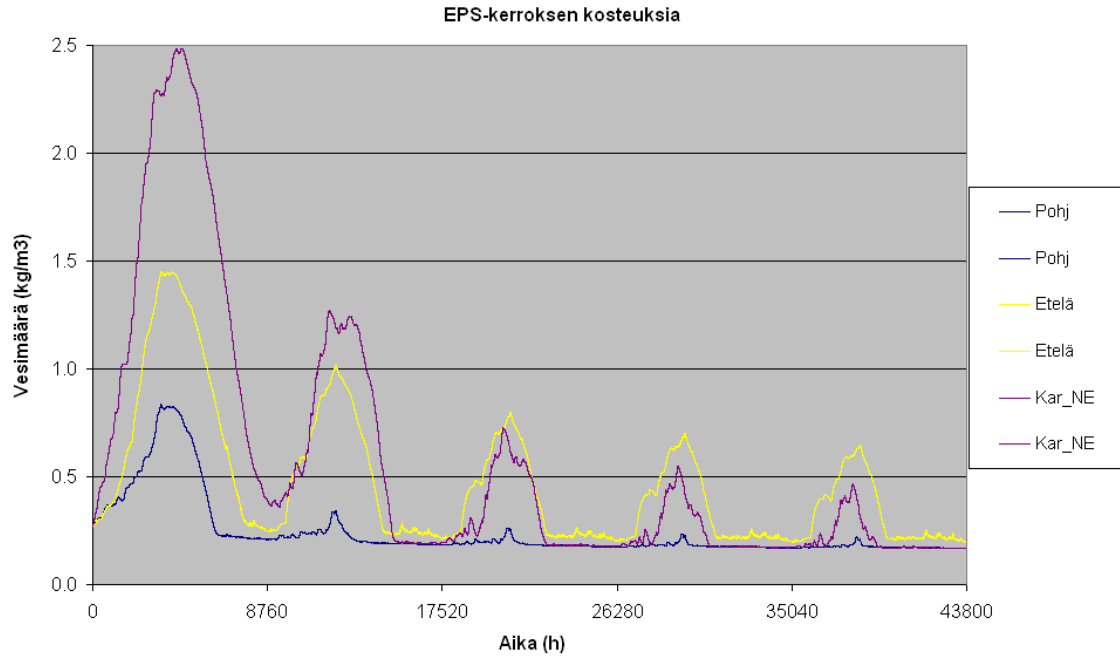
	Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus koillisella julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )						
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	39.8	50.3	64.4	48.7	16.2	36.1	255.6
2.vuosi	37.7	47.1	59.6	44.6	14.5	33.2	236.7
3.vuosi	35.1	44.4	55.2	41.1	13.3	30.6	219.8
4.vuosi	33.6	42.8	52.3	38.8	12.7	28.1	208.2
5.vuosi	32.7	41.7	50.6	37.4	12.3	26.8	201.6

### 3.2.2. Rakennetyyppi US2

Rakennetyyppi US2 edustaa myös nykyisen käytännön mukaista eristysvahvuutta, mutta eristeenä on uritettu EPS. Laskenta suoritettiin kuitenkin ilman urituksen huomioimista, paitsi erillisissä tuulettuvuustarkasteluissa. Kuvassa (Kuva 3.13) on esitetty rakennetyypin US2 ulkokuoren keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri ilmansuunnille laskentajakson aikana. Eteläinen julkisivu Espoossa ei juuri kuivunut, toisin kuin muut vaihtoehdot. Kuivimpana pysyi pohjoiseen suunnattu julkisivu Espoossa. Karasjoen koillisjulkisivu pysyi hieman kosteampana kuin Espoon pohjoinen, mutta kuitenkin kuivempana kuin nollajulkisivu. EPS:n vesimäärä (Kuva 3.14) kuitenkin pieneni laskennan loppua kohden kaikilla julkisivuilla. Espoon eteläjulkisivulla viistosateet pitivät myös eristekerroksen selvästi kosteampana kuin muilla laskentatapuksilla. Maksimikosteudet olivat todellisuutta suurempia johtuen kohdassa 3.1.2.2 esitetystä todellisten kosteuskapasiteettien korjauksesta.

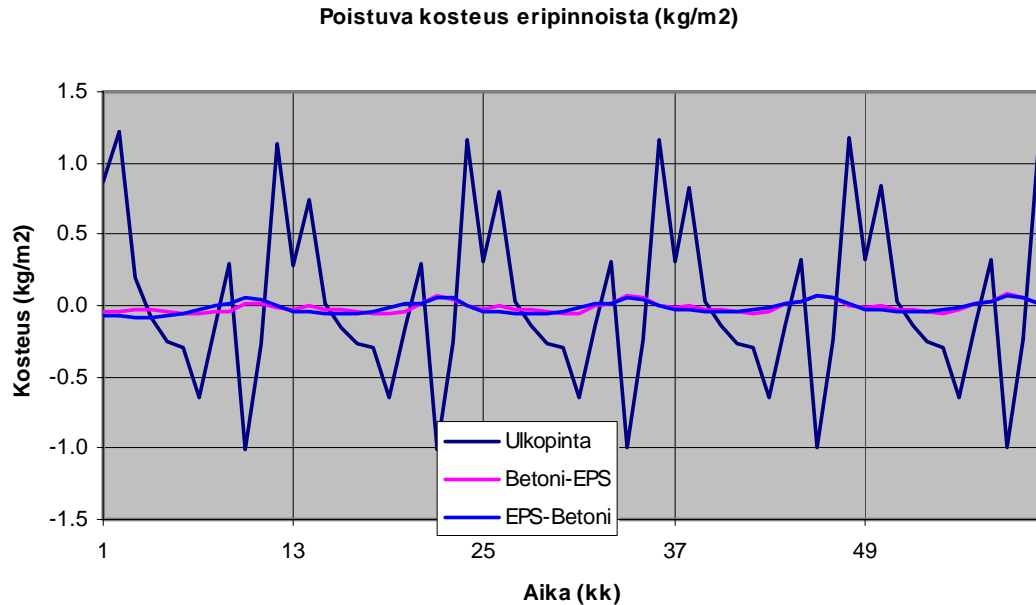


**Kuva 3.13** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden (kg/m<sup>3</sup>) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US2 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuuletuksista ei ole huomioitu. Laskennan alkuehti oli 1.10.2009.



**Kuva 3.14** Kuvassa on esitetty EPS:n keskimääräisiä kosteuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) eräille laskentatapauksille ilman tuuletusta. Kohdassa 3.1.2.2 tehdyn kosteuskapasiteetti käytän korjauksen johdosta maksimiarvot ovat selvästi todellisuutta suurempia etenkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Eteläisen julkisivun tapauksessa eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden liikettä on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.15). Ulospäin suuntautuva kosteusvirta ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) on kuvassa negatiivista ja sisäänpäin suuntautuva positiivista. Suurimmat kosteuden siirtymiset tapahtuivat ulkopinnassa. Eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa sekä eristeen ja sisäkuoren rajapinnassa kosteuden liikkeet olivat sen sijaan pienemmät. Rakenteen sisällä tapahtuvat kosteuden liikkeet olivat lisäksi pääasiassa sisältä ulospäin suuntautuvia.



**Kuva 3.15** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Oheisessa taulukossa (Taulukko 3.10) on esitetty tarkemmin vuosittaisella tasolla eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden siirtymistä. Rakenteen sisäpinnoissa poistuva kosteus jäi pienemmäksi kuin rakennetyypillä US1 tiiviimmästä eristekerroksesta johtuen, suurimpien kosteusvirtojen ollessa kolmen ensimmäisen vuoden aikana. Ulkokuoren ulkopinnassa kosteusvirrat olivat edelleen suurimmat auringon säteilyn ja viistosateen vaikutuksesta.

**Taulukko 3.10** Taulukossa on esitetty kosteuden siirtymistä eri rajapinnoissa vuosittasolla Espoon eteläisellä julkisivulla kg/m<sup>2</sup>/vuosi. Miinusmerkkinen lukema tarkoittaa kosteusvirtaa sisältä ulospäin ja plusmerkkinen ulkoa sisälle päin.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - EPS (kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-22.279	23.301	1.022	-0.020	-0.354	-0.373	-0.302	-0.066	-0.368
<b>2 vuosi</b>	-22.882	22.603	-0.278	-0.005	-0.182	-0.187	-0.184	0.003	-0.181
<b>3 vuosi</b>	-22.806	22.676	-0.130	0.000	-0.096	-0.096	-0.184	0.003	-0.181
<b>4 vuosi</b>	-22.770	22.707	-0.063	0.003	-0.050	-0.047	-0.053	0.006	-0.047
<b>5 vuosi</b>	-22.749	22.722	-0.027	0.004	-0.023	-0.019	-0.024	0.005	-0.019
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>0.523</b>			<b>-0.722</b>			<b>-0.797</b>

Tuuletuksen kosteuden poistokykyä on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 3.11). Laskelmissa virtausnopeutena ja urakokona käytettiin vastaavia kuin rakennetyypillä US1. Taulukon arvoista voi todeta auringon säteilyn merkittävän vaikutuksen tuuletuksen edistäjänä. Kaikkiaan arvot jäivät pienemmäksi kuin US1 rakennetyypillä. Eniten kosteutta uritus kykenee poistamaan touko-, heinä- ja elokuussa.

**Taulukko 3.11** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä arvioituja tuuletusuran kosteudenpoistoja Espoon eteläisellä ja nollajulkisivulla. Laskennassa virtausnopeutena oli 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150. Laskennassa lämpötilat ja suhteelliset kosteudet on saatu WUFI:n tuloksista tunnin välein laskentajakson ajalta. Tuuletuksen mukana poistuva kosteus on laskettu näiden tulosten perusteella joka tunnille erikseen ja vuoden sekä kuukausitason poistuvat kosteudet on laskettu summaamalla näitä tunnin jaksoja tarvittava määrä.

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	21.3	17.8	36.0	29.3	15.5	36.6	156.5
2.vuosi	21.3	17.7	35.5	28.6	15.2	38.4	156.6
3.vuosi	21.3	17.6	35.2	28.4	15.1	38.1	155.6
4.vuosi	21.3	17.6	35.0	28.3	15.0	38.0	155.1
5.vuosi	21.2	17.5	35.0	28.2	15.0	37.9	154.9

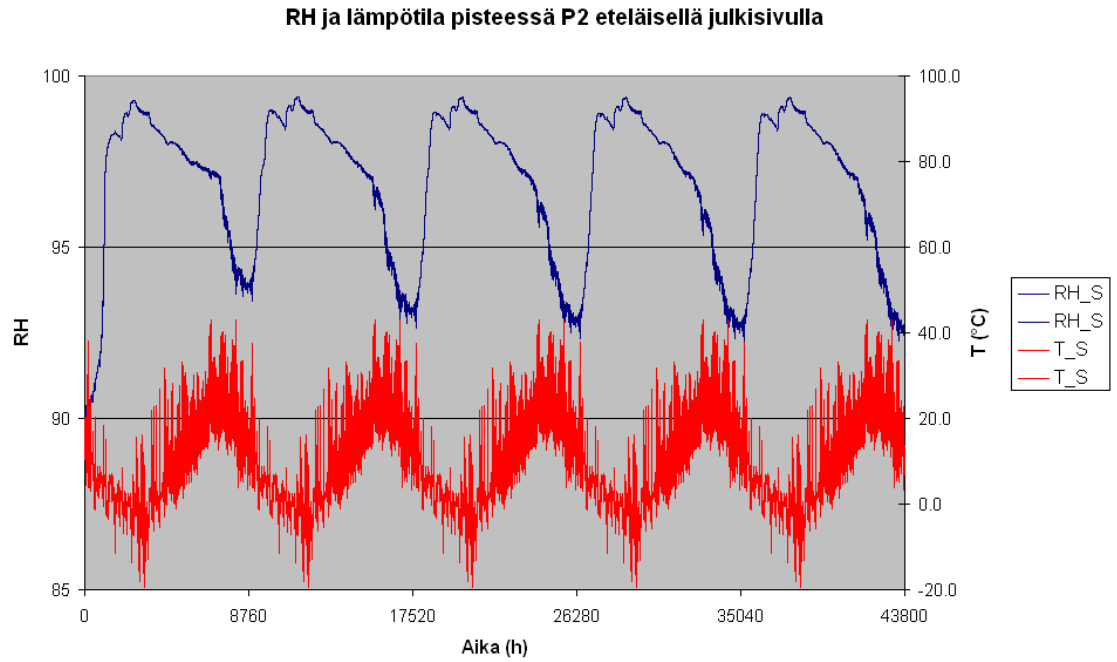
  

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	7.8	5.8	10.9	6.6	3.9	9.9	44.9
2.vuosi	7.8	5.5	10.5	6.3	3.7	10.8	44.5
3.vuosi	7.5	5.2	10.1	5.9	3.4	9.8	42.0
4.vuosi	7.3	5.0	9.8	5.6	3.3	9.0	40.0
5.vuosi	7.2	4.9	9.6	5.5	3.2	8.4	38.7

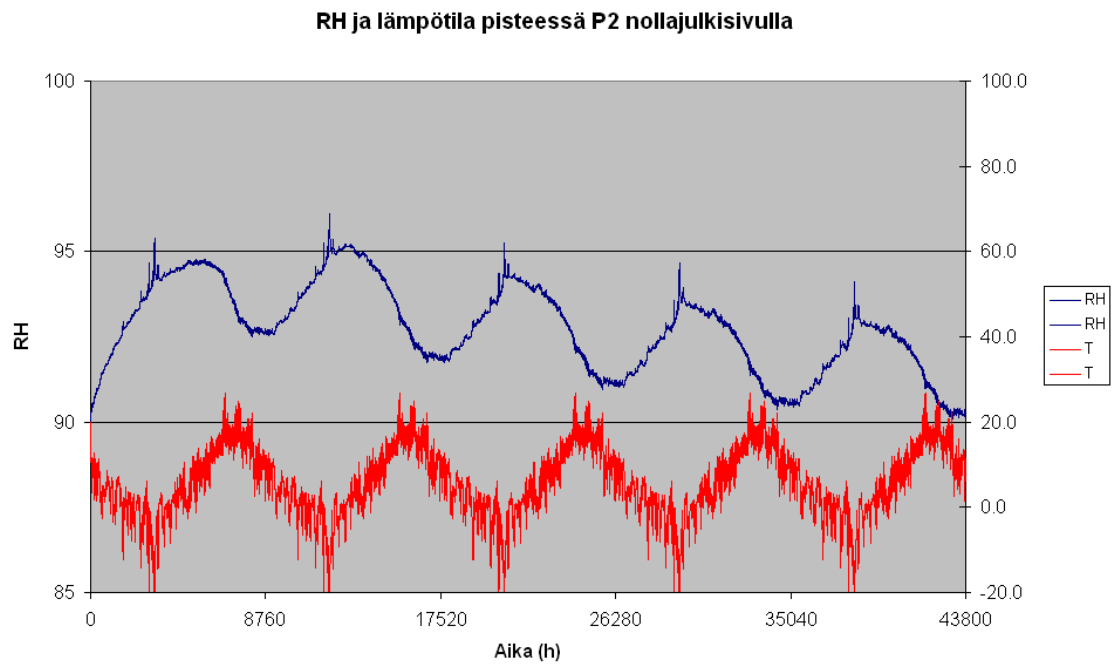
**Taulukko 3.12** Taulukossa on esitetty vertailuvuoksi erilaisissa stationääritilanteessa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa (g/m<sup>2</sup>kk). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ja EPS:lle  $4,72 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Olosuhteet	7.74	0.69	12.37	0.79	17.43	0.74	16.54	0.81	10.21	0.82	0.15	0.87
g (g/m <sup>2</sup> kk)	9.71		6.52		7.66		5.53		5.91		66.93	

Suhteellisen kosteuden vaihtelua laskentajakson aikana erijulkisivuilla on esitetty kuvissa (Kuva 3.16 ja Kuva 3.17). Eteläisellä julkisivulla suhteellinen kosteus pysyi pääasiassa yli 95 % koko laskentajakson ajan ja maksimi suhteellinen kosteus oli hieman yli 99 %. Nollajulkisivulla suhteellinen kosteus ei sen sijaan ylittänyt laskentajakson aikana juurikaan 95 % ja pieneni laskenta-ajan edetessä. Siinä missä eteläinen julkisivu ei sateen johdosta juurikaan kuivunut (ks. Kuva 3.13), nollajulkisivu kuivui laskentajakson aikana, joka osaltaan selittää erot RH-käyrissä.



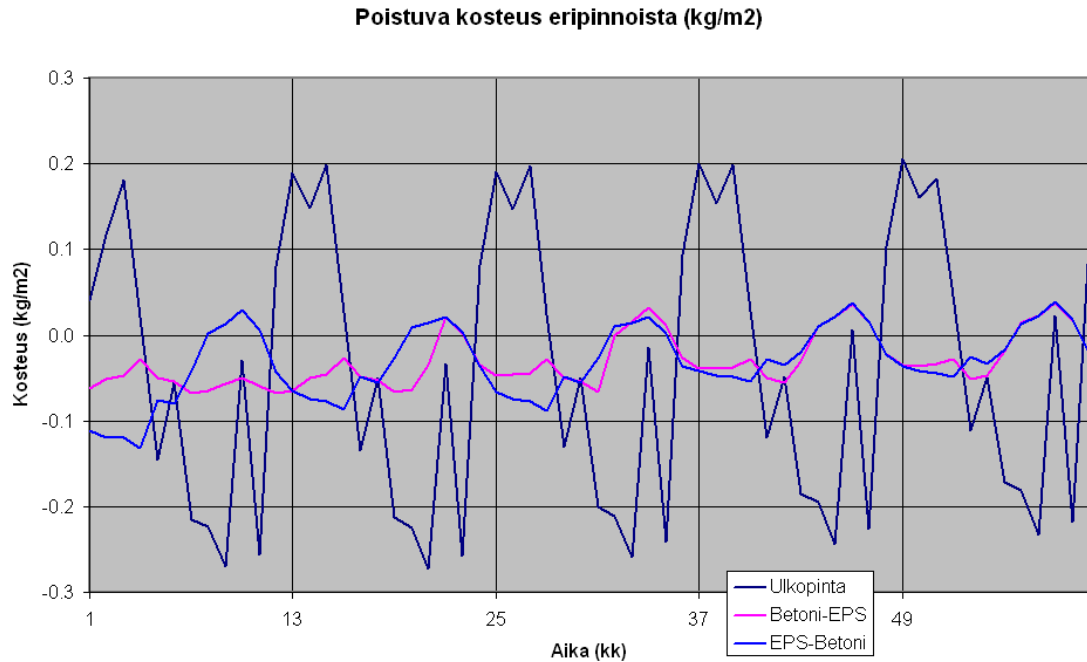
**Kuva 3.16** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa (Piste P2) Espoon eteläisellä julkisivulla, kun tuuletusta ei huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %.



**Kuva 3.17** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa (piste P2) Espoon nollajulkisivulla ilman tuuletusta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009

### 3.2.2.1 US2 Karasjoen ilmastossa

Kuvassa (Kuva 3.18) on esitetty eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden siirtymistä kuukausittain laskentajakson aikana Karasjoen koillisjulkisivulla. Kuvasta nähdään talvikautena tapahtuvan kohtuullisen voimakasta kosteuden tiivistymistä ulkopinnassa, noin  $200\text{g/m}^2$ , joka kuitenkin kuivui kesäkauden aikana. Eristeen rajapinnassa tapahtui myös talvisaikaan kondenssia, joka kuitenkin kuivui kesäkuukausina.



**Kuva 3.18** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.

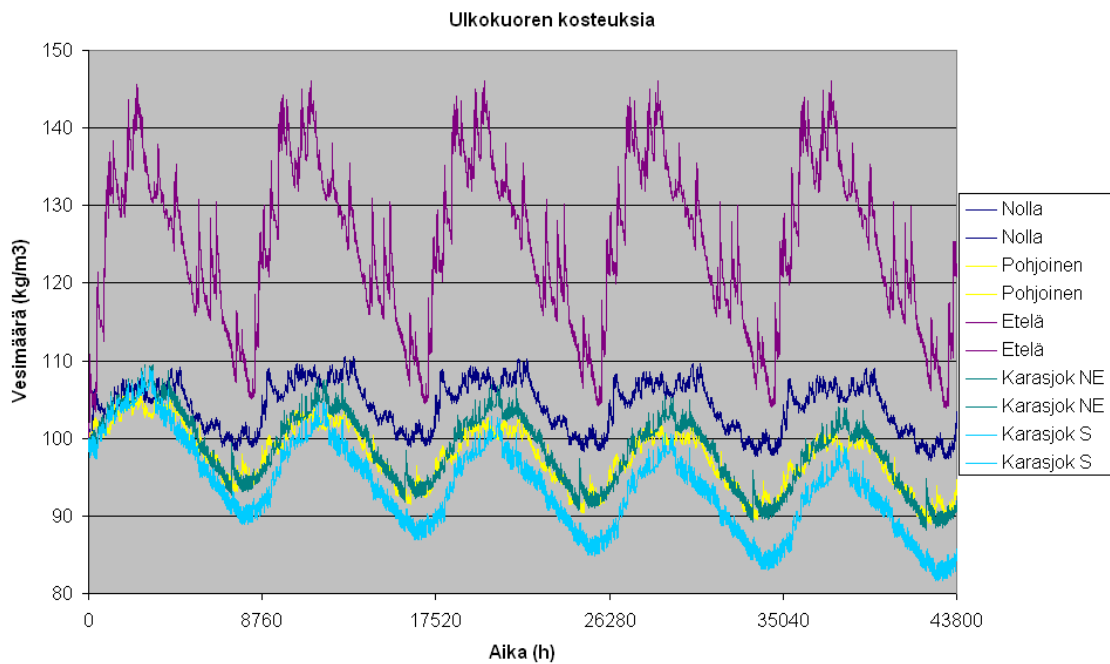
Oheisessa taulukossa (Taulukko 3.13) on eritelty tarkemmin vuositasolla eri pinnoissa tapahtuva kosteuden siirtyminen Karasjoen koillisjulkisivulla. Vuosittaiset kosteusvirrat olivat joka rajapinnassa negatiiviset, joka tarkoittaa kuivumista, kuten jo kuvasta (Kuva 3.13) voi huomata.

**Taulukko 3.13** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kosteusvirtoja eri rajapintojen läpi ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ).

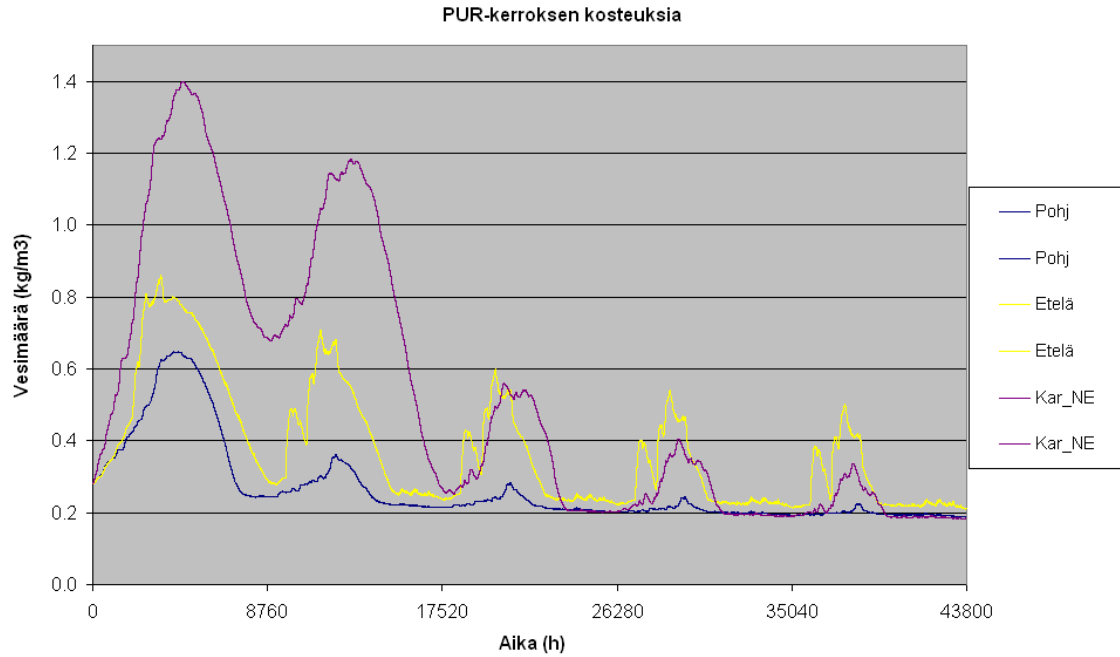
	Ullkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - EPS ( $\text{kg/m}^2$ )			EPS - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
<b>1 vuosi</b>	-1.205	0.446	-0.759	-0.076	-0.584	-0.660	-0.594	-0.078	-0.673
<b>2 vuosi</b>	-0.989	0.446	-0.543	-0.054	-0.411	-0.465	-0.421	-0.003	-0.424
<b>3 vuosi</b>	-0.901	0.446	-0.454	-0.040	-0.262	-0.301	-0.421	-0.002	-0.423
<b>4 vuosi</b>	-0.775	0.446	-0.329	-0.032	-0.186	-0.218	-0.213	0.000	-0.213
<b>5 vuosi</b>	-0.688	0.446	-0.241	-0.026	-0.150	-0.177	-0.174	0.000	-0.174
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-2.326</b>			<b>-1.820</b>			<b>-1.907</b>

### 3.2.3. Rakennetyyppi US3

Rakennetyyppi US3 on urittamaton PUR-eristeinen BSW-rakenne, joka lämmöneristekykynsä puolesta jää aavistuksen 2010 määräyksistä. Rakennetyypin US3 ulkokuoren keskimääräiset kosteudet on esitetty oheisessa kuvassa (Kuva 3.19). Jälleen Espoon eteläinen julkisivu pysyi kosteimpana, eikä kosteus näytä laskevan ajan kuluessa. Muissa tapauksissa ulkokuori kuivui ja maksimi vesimäärä pysyi alle 110 kg/m<sup>3</sup>, Karasjoen eteläisellä julkisivulla maksimi vesimäärä asettui alle 100 kg/m<sup>3</sup> tasolle. Karasjoen koillisjulkisivun ja Espoon pohjoisjulkisivun vesimäärät ovat lähes samat talvikausia lukuun ottamatta, jolloin Karasjoella vesimäärä oli hieman korkeampi. Eristekerroksessa vesimäärät pienenivät laskennan loppua kohden (Kuva 3.20).

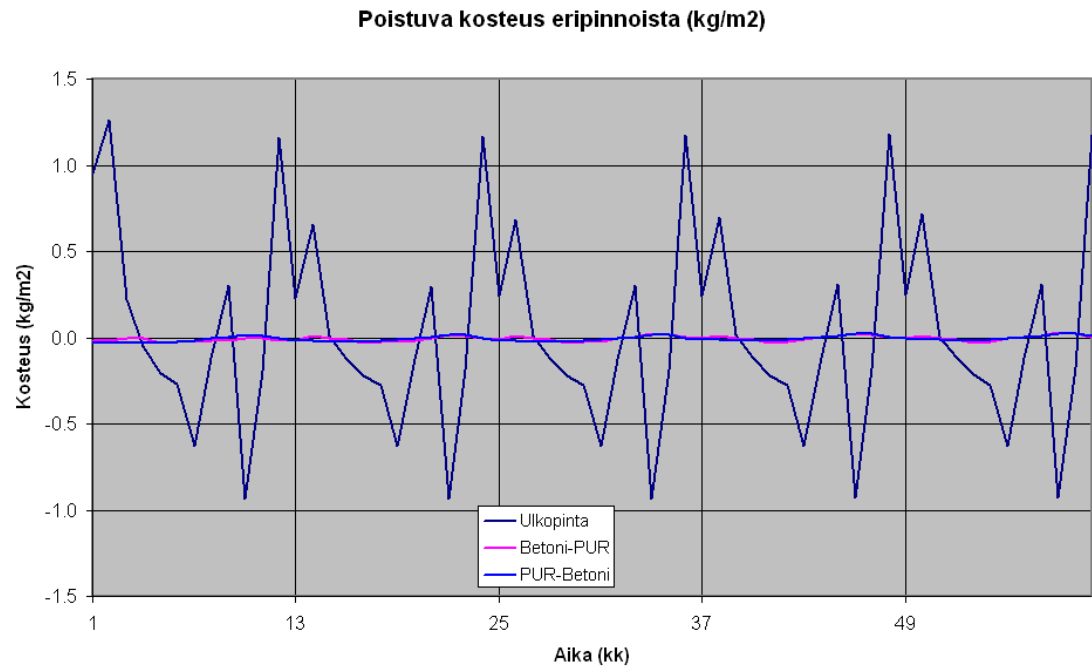


**Kuva 3.19** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden (kg/m<sup>3</sup>) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US3 erilaisilla sääolosuhteilla ilman tuuletusta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.



**Kuva 3.20** Kuvassa on esitetty PUR:n keskimääräinen vesipitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ ) laskentajakson aikana kolmelle laskentatapaukselle, kun tuuletusta ei huomioitu. Kosteuskapasiteetin korjauksesta johtuen (kohta 3.1.2.2) maksimikosteudet olivat todellista suurempia. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Espoon eteläisellä julkisivulla eri rajapintojen kosteusvirtoja on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.21). Suurimmat kosteusvirrat olivat taas ulkopinnassa ja sisempänä rakennetta rajapinnoissa kosteusvirrat olivat pieniä, ja ovat itse asiassa pienempiä kuin EPS- tai villaeristeisellä rakenteella.



**Kuva 3.21** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.



Tarkemmin kosteusvirtojen suuruuksia vuositasona on havainnollistettu taulukossa (Taulukko 3.14). Taulukosta nähdään, että alkutilanteeseen nähden ulkokuoreen meni enemmän kosteutta sisälle kuin ulos. Tuulettumattomana ei ole kosteusvirroista havaittavissa merkittävää kuivumista, sillä parin vuoden jälkeen kuivuva kosteusvirta jää muutamaa grammaan.

**Taulukko 3.14** Taulukossa on esitetty Espoon eteläisen julkisivun kosteusvirtoja vuositasona rajapinnoittain yksikössä  $\text{kg/m}^2$  vuodessa, kun tuuletusta ei huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisäänpäin.

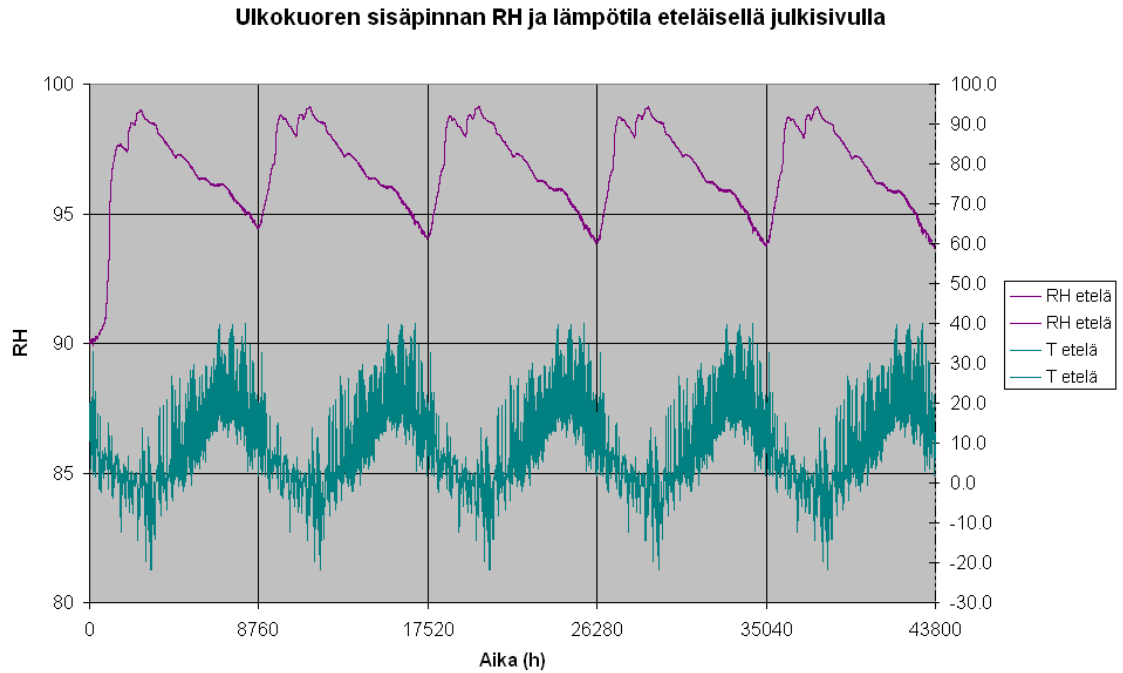
	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - PUR ( $\text{kg/m}^2$ )			PUR - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-20,668	22,157	1,489	-0,063	-0,106	-0,169	-0,170	0,001	-0,169
2 vuosi	-21,445	21,301	-0,144	-0,057	-0,048	-0,105	-0,105	0,010	-0,096
3 vuosi	-21,407	21,334	-0,073	-0,055	-0,001	-0,056	-0,105	0,010	-0,096
4 vuosi	-21,383	21,351	-0,032	-0,053	0,033	-0,021	-0,021	0,001	-0,020
5 vuosi	-21,365	21,363	-0,002	-0,052	0,056	0,004	0,003	0,001	0,004
Poistuva kosteus/rajapinta:			1,238			-0,346			-0,376

Vastaava taulukko esitettynä julkisivun ollessa Espoossa pohjoiseen (Taulukko 3.15) osoittaa eteläisen julkisivun huomattavan saderasituksen. Jos verrataan pohjoisen julkisivun ja eteläisen julkisivun kosteusvirtoja, voidaan todeta pohjoisella julkisivulla tapahtuneen rakenteen kuivumista kaikissa rajapinnoissa toisin kuin eteläisellä julkisivulla. Ulkopinnan kosteusvirroista voidaan myös havaita, että sateen ja auringon vaikutukset ovat huomattavasti pienemmät pohjoisella julkisivulla.

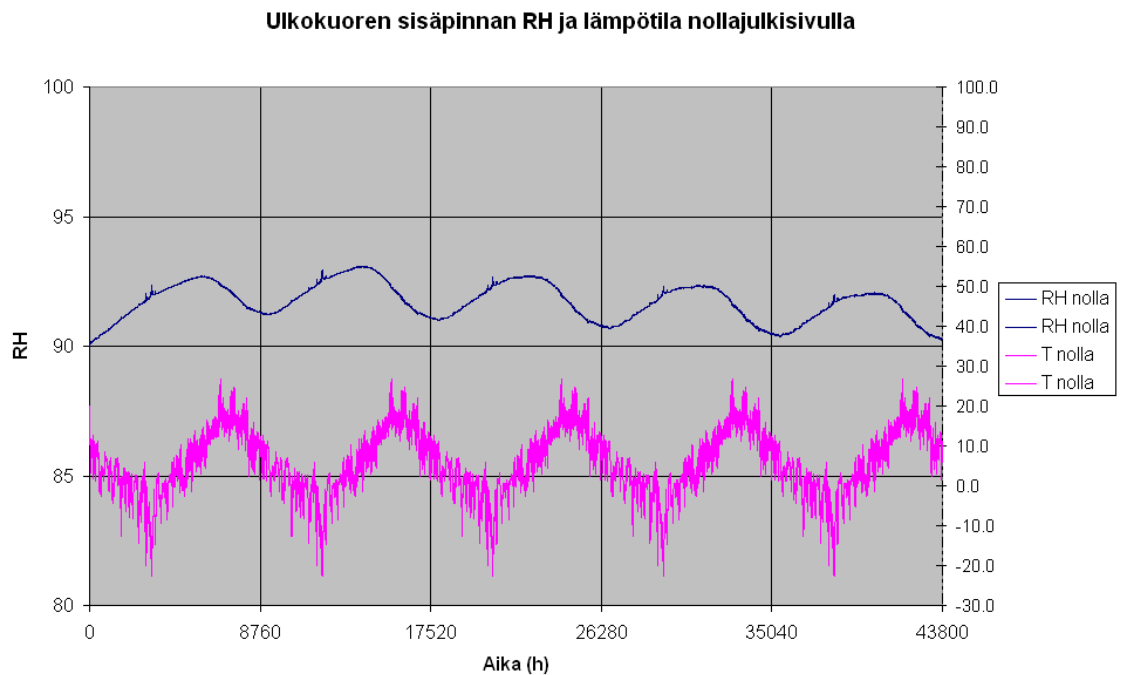
**Taulukko 3.15** Taulukossa on esitetty Espoon pohjoisjulkisivun kosteusvirtoja vuositasona rajapinnoittain yksikössä  $\text{kg/m}^2$  vuodessa, kun tuuletusta ei huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisäänpäin.

	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - PUR ( $\text{kg/m}^2$ )			PUR - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-1,046	0,709	-0,337	-0,106	-0,133	-0,239	-0,221	-0,012	-0,232
2 vuosi	-0,981	0,709	-0,272	-0,095	-0,071	-0,166	-0,163	0,003	-0,161
3 vuosi	-0,898	0,709	-0,189	-0,088	-0,028	-0,116	-0,163	0,003	-0,161
4 vuosi	-0,842	0,709	-0,133	-0,081	0,003	-0,078	-0,076	0,000	-0,076
5 vuosi	-0,801	0,709	-0,092	-0,075	0,022	-0,053	-0,053	0,000	-0,053
Poistuva kosteus/rajapinta:			-1,022			-0,652			-0,682

Suhteellista kosteutta pisteessä P2 tarkasteltiin sekä Espoon etelä- että nollajulkisivulla. Eteläjulkisivulla (Kuva 3.22) suhteellinen kosteus elää suunnilleen samanlaista sykliä vuodesta toiseen, kesäaikaisen minimikosteuden kuitenkin pienessä laskennan loppua kohden. Nollajulkisivulla (Kuva 3.23) suhteellisen kosteuden vaihtelu pysyi oikeastaan samana kolme ensimmäistä vuotta, jonka jälkeen alkoi hienoinen lasku niin minimi kuin maksimi kosteudessa. Verrattuna eteläjulkisivuun suhteellinen kosteus vaihteli vuodenaikojen mukana vähemmän ja oli muutenkin pienempi nollajulkisivulla.



**Kuva 3.22** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Espoon eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

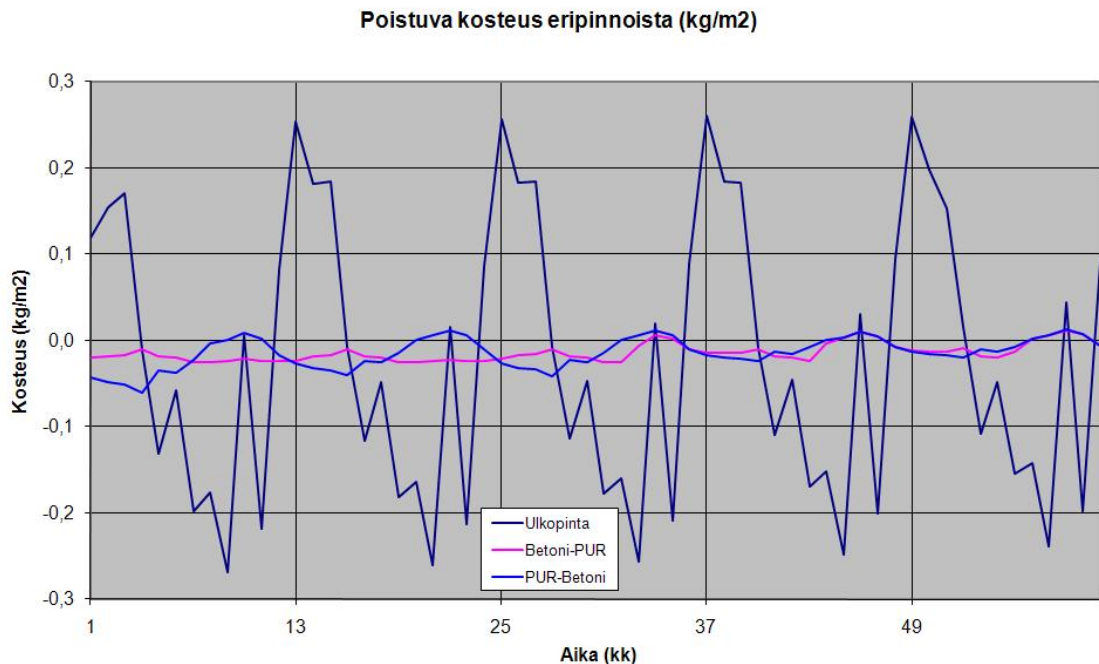


**Kuva 3.23** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana pisteessä P2 nollajulkisivulla ilman tuuletusta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

### 3.2.3.1 US3 Karasjoen ilmastossa

Karasjoella kuvan (Kuva 3.19) mukaan julkisivun ollessa koilliseen pysyi rakenne kosteimpana. Kuvassa (Kuva 3.24) on esitetty koillisjulkisivun kosteusvirrat eri

rajapinnoissa. Talvikaudella ulkopinnasta virtasi kosteutta sisäänpäin, jolloin ulkokuoren kosteus kasvoi. Suurimmillaan ulkopinnasta sisälle päin pyrkivä kosteus oli luokkaa  $250 \text{ g/m}^2$ . Tammi- ja helmikuussa sisäkuoren ja eristeen sisäpinnasta ulospäin pyrkivä kosteusvirta oli suurempi kuin ulkokuoren ja eristeen rajapinnasta ulospäin pyrkivä kosteusvirta. Näin ollen rakenteessa on odotettavissa ajoittaista kondenssia rajapinnassa.



**Kuva 3.24** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, kun tuulettusta ei huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.

Tarkemmin vuositasolla yhteenlaskettuja poistuvan ja kerääntyvän kosteuden summia on esitetty taulukossa (Taulukko 3.16). Kaikissa rajapinnoissa vuositasolla laskettu kosteuden kokonaismäärä oli negatiivinen, jolloin nettovirtaus joka rajapinnasta on ulospäin. Kosteusvirtojen pieneminen vuosien kuluessa osoittaa rakenteen kuivumista.

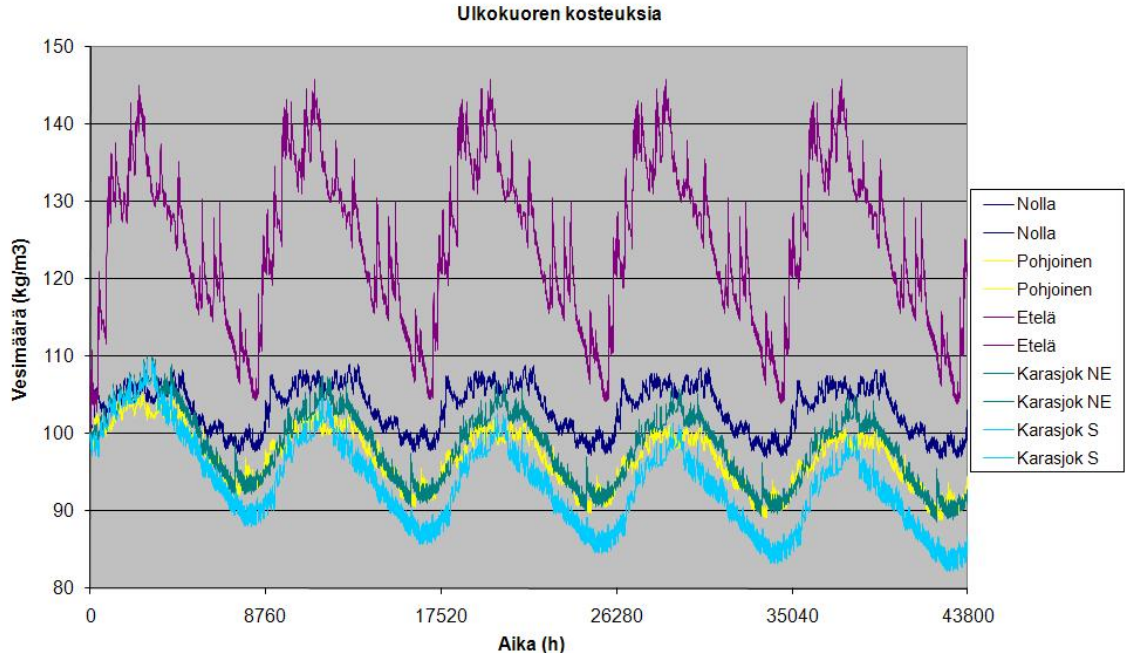
Ensimmäisenä vuotena sisäkuoren ja polyuretaanin rajapinnasta poistuva kosteusvirta oli suurempi kuin polyuretaanin ja ulkokuoren rajapinnasta. Seuraavina vuosina tilanne tasaantui hieman, mutta laskenta jakson aikana eristeen sisäpinnasta poistuva kosteusmäärä oli hieman suurempi kuin ulkopinnasta poistuva. Jatkuvasti pienenevät kosteusvirrat myös antavat viitteitä, että rakenne ei vielä 5 vuoden laskentajakson aikana saavuttanut tasapainotilaa käytetyn ilmastoinnin kanssa, vaan kuivuminen olisi jatkunut vielä muutaman vuoden.

**Taulukko 3.16** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kosteusvirtoja vuositasolla rajapinnoittain yksikössä  $\text{kg/m}^2$  vuodessa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisäänpäin..

	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - PUR ( $\text{kg/m}^2$ )			PUR - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-0,975	0,446	-0,529	-0,101	-0,143	-0,244	-0,306	0,000	-0,307
2 vuosi	-0,715	0,446	-0,269	-0,101	-0,148	-0,249	-0,189	0,008	-0,181
3 vuosi	-0,684	0,446	-0,238	-0,087	-0,073	-0,159	-0,189	0,008	-0,181
4 vuosi	-0,627	0,446	-0,181	-0,078	-0,027	-0,105	-0,102	0,000	-0,102
5 vuosi	-0,575	0,446	-0,128	-0,072	-0,002	-0,074	-0,073	0,000	-0,073
Poistuva kosteus/rajapinta:			-1,346			-0,831			-0,844

### 3.2.4. Rakennetyyppi US4

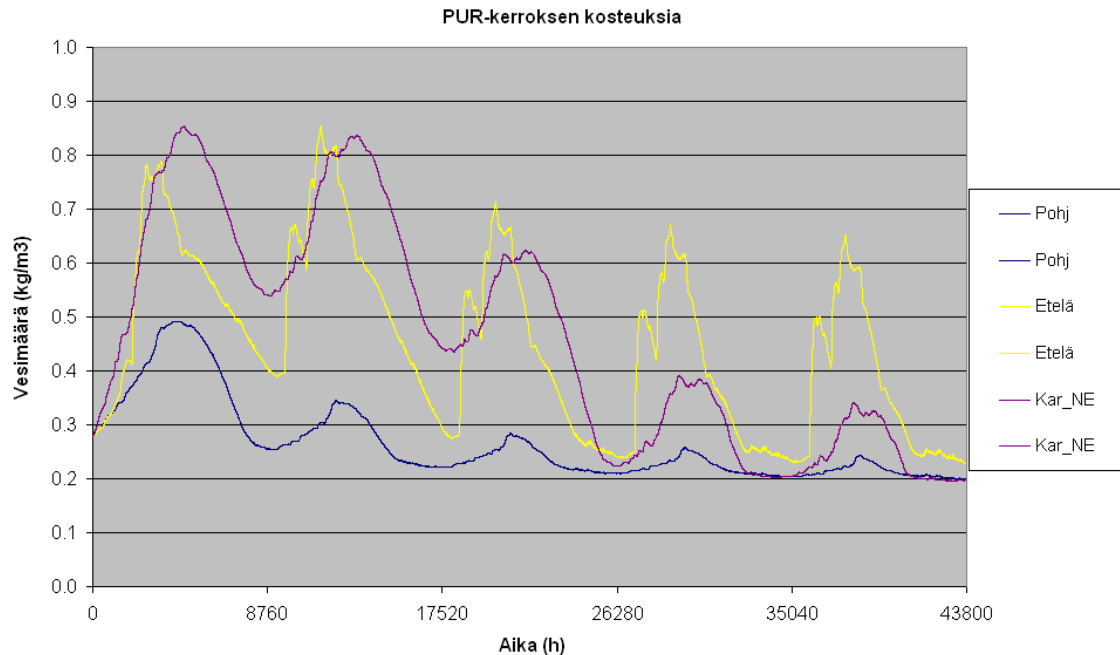
Rakennetyyppi US4 on tuulettamaton PUR-eristeinen rakenne, joka lämmöneristys kykynsä puolesta täyttää sekä 2010 että 2012 tulevat määräykset. Oheisessa kuvassa (Kuva 3.25) on esitetty rakennetyypille US4 ulkokuoren keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri ilmastoissa ja ilmansuunnissa. Jälleen Espoon eteläinen julkisivu pysyi kosteimpana eikä juuri kuivunut. Muilla laskentatapauksilla kuivumista oli havaittavissa. Karasjoen eteläinen julkisivu asettui kuivimmaksi laskennan loppuhetkillä, Karasjoen koillinen ja Espoon pohjoinen olivat hieman eteläjulkisivua kosteampia. Nollajulkisivulla vuoden aikana tapahtuva kosteus vaihtelu jäi pienimmäksi ja keskimääräinen kosteus oli hieman korkeampi kuin Karasjoen koillisjulkisivulla.



**Kuva 3.25** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US4 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Eristekerroksen keskimääräistä kosteuspitoisuutta on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.26). Jälleen maksimivesimäärät ovat liioiteltuja kosteuskapasiteetti käyrän

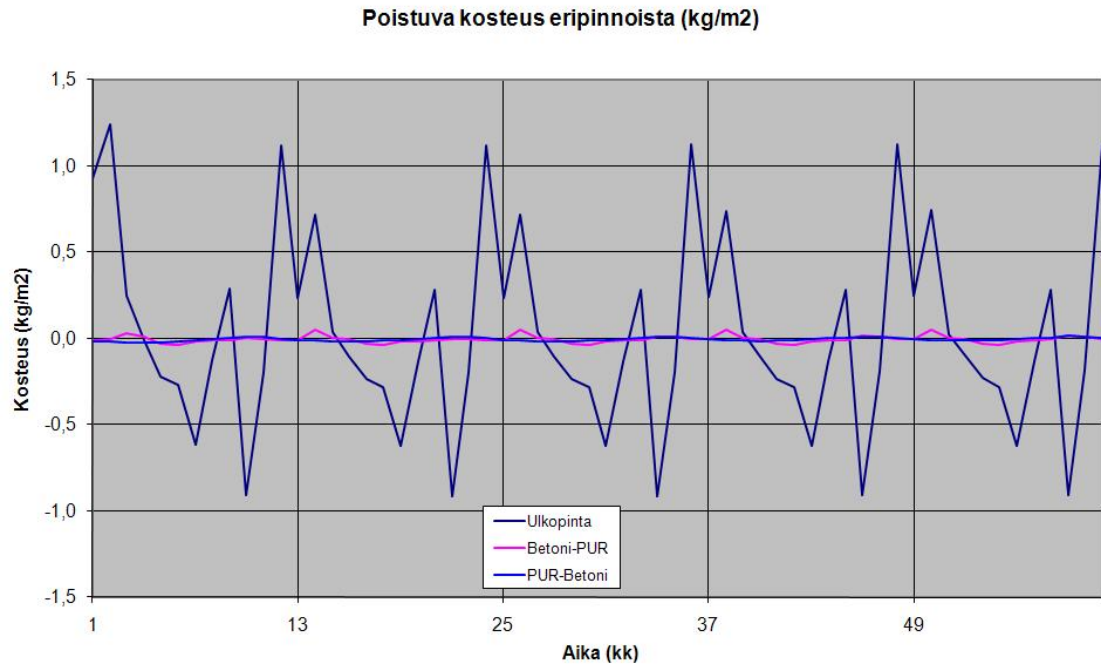
muokkaamisesta johtuen, kuten kohdassa 3.1.2.2 kerrottiin. Kaikilla julkisivu tapauksilla oli havaittavissa eristekerroksen kuivumista ilman tuuletustakin, eteläisellä julkisivulla vähiten. Espoon pohjoisjulkisivu kuivui nopeimmin ja sen kosteusvaihtelu vuoden sisällä jäi pienimmäksi. Karasjoen koillisjulkisivu kuivui hieman hitaammin, mutta kuitenkin lopussa minimikosteus asettui samalle tasolle kuin Espoon pohjoisjulkisivulla.



**Kuva 3.26** Kuvassa on esitetty PUR:n keskimääräisiä kosteuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) eräille laskentatapauksille ilman tuuletusta. Kohdassa 3.1.2.2 tehdyn kosteuskapasiteetti käytän korjauksen johdosta maksimiarvot selvästä todellisuutta suurempia etenkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Rakenteen eri rajapinnoista eteläisellä julkisivulla poistuvia kosteuksia kuukausitasolla on esitetty kuvassa (Kuva 3.27). Ulkopinnassa oli jälleen suurimmat kerääntyvät ja poistuvat kosteudet ja rakenteen sisäpinnoissa kosteusvirrat olivat pieniä. Ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa oli havaittavissa pieni kerääntymispiikki marraskuun tienoilla. Syys- ja marraskuussa ulkokuoreen kerääntyi eniten kosteutta ja vastaavasti huhtikuussa ja heinäkuussa ulkokuoresta poistui eniten kosteutta.

Vuositasolla eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden kerääntymistä ja poistumista eteläisellä julkisivulla on esitetty taulukossa (Taulukko 3.17). Rakenteen sisemmät rajapinnat kuivuivat hitaasti siirtäen kosteutta ulkokuorta kohden. Ulkopinnassa ensimmäisen vuotena kosteutta kerääntyi huomattavasti enemmän kuin sitä kuivui, mutta tämän jälkeen myös ulkokuoreessa alkoi hidas kuivuminen. Laskentajakson viimeisenä vuotena poistuvan kosteuden määrä oli luokkaa  $30 \text{ g/m}^2/\text{vuosi}$ , mitä ei voida enää pitää merkittävänä kuivumisena.



**Kuva 3.27** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

**Taulukko 3.17** Taulukossa on esitetty eteläisen julkisivun tapauksessa eri rajapinnoista vuosittain poistuva tai kerääntyvä kosteus kilogrammoina neliötä kohden sekä kapillaarisen ja diffuusiivisen kosteusvirran suuruudet kg/m<sup>2</sup>s. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisäänpäin..

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - PUR (kg/m <sup>2</sup> )			PUR - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-21,077	22,556	1,479	-0,032	-0,062	-0,094	-0,121	-0,002	-0,123
<b>2 vuosi</b>	-21,839	21,748	-0,091	-0,031	-0,067	-0,098	-0,080	0,009	-0,071
<b>3 vuosi</b>	-21,839	21,747	-0,092	-0,028	-0,037	-0,065	-0,080	0,009	-0,071
<b>4 vuosi</b>	-21,815	21,767	-0,048	-0,027	-0,015	-0,041	-0,041	0,003	-0,038
<b>5 vuosi</b>	-21,807	21,774	-0,033	-0,026	-0,004	-0,031	-0,030	0,002	-0,028
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>1,215</b>			<b>-0,329</b>			<b>-0,332</b>

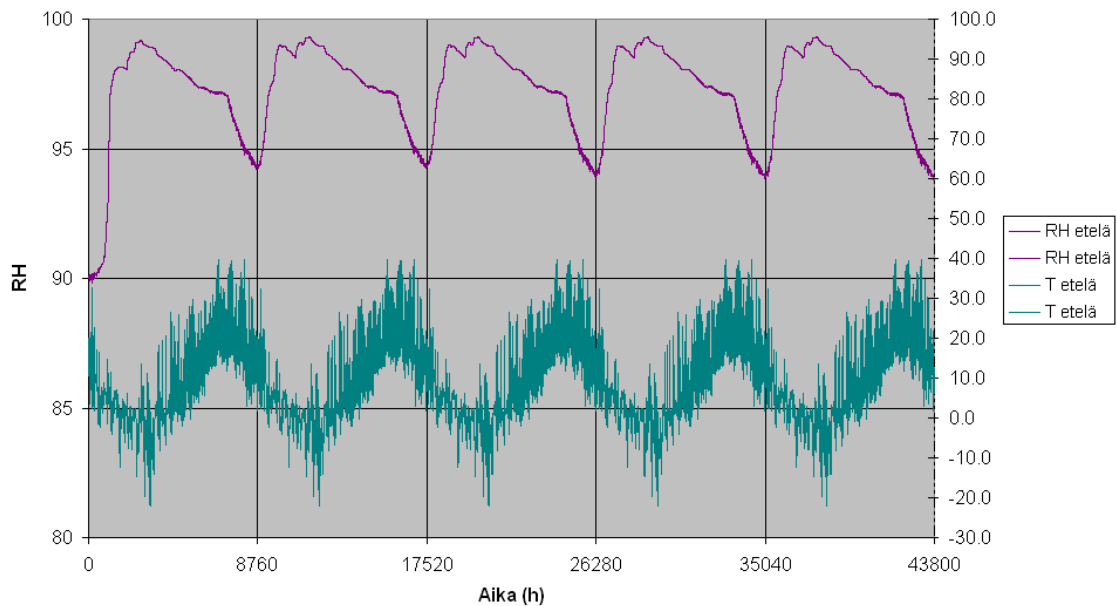
Vastaavasti pohjoisella julkisivulla tapahtuvaa kosteuden kerääntymistä ja poistumista on esitetty taulukossa (Taulukko 3.18). Verrattuna eteläiseen julkisivuun kosteuden poistuminen oli selvästi suurempaa eikä vuositasolla kerääntymistä tapahtunut yhdessäkään rajapinnoista. Laskennan lopussa poistuvan kosteuden määrä sisemmistä rajapinnoista oli n. 70 g/m<sup>2</sup>/vuosi ja ulkopinnasta hieman alle 100 g/m<sup>2</sup>/vuosi.

**Taulukko 3.18** Taulukossa on esitetty pohjoisen julkisivun eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden liikettä kilogrammoina neliötä kohden vuodessa sekä kapillaarisen ja diffuusivisen kosteusvirran suuruudet kg/m<sup>2</sup>/vuosi. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisäänpäin..

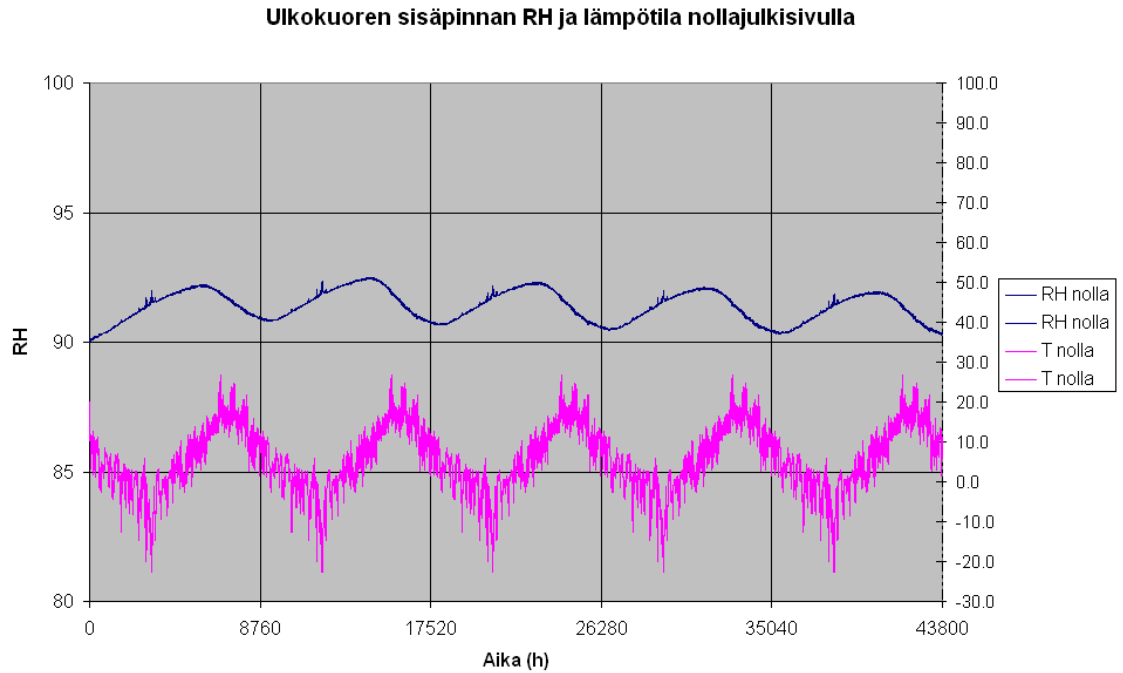
	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - PUR (kg/m <sup>2</sup> )			PUR - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	g <sub>diff</sub>	g <sub>cap</sub>	yht	g <sub>diff</sub>	g <sub>cap</sub>	yht	g <sub>diff</sub>	g <sub>cap</sub>	yht
1 vuosi	-1,048	0,709	-0,339	-0,073	-0,096	-0,168	-0,152	-0,010	-0,162
2 vuosi	-0,940	0,709	-0,231	-0,066	-0,065	-0,131	-0,125	0,002	-0,123
3 vuosi	-0,869	0,709	-0,160	-0,062	-0,041	-0,103	-0,125	0,002	-0,123
4 vuosi	-0,829	0,709	-0,119	-0,059	-0,027	-0,086	-0,085	0,001	-0,084
5 vuosi	-0,805	0,709	-0,096	-0,057	-0,017	-0,074	-0,073	0,001	-0,073
Poistuva kosteus/rajapinta:			-0,945			-0,561			-0,563

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkasteltiin pisteessä P2 sekä etelä- että nollajulkisivulle Espoossa. Eteläjulkisivulla (Kuva 3.28) suhteellinen kosteus käyttäytyi kuten rakennetyypillä US3 eikä merkittävää eroa ollut havaittavissa rakennetyyppien kesken. Nollajulkisivulla (Kuva 3.29) käyrä oli samansuuntainen kuin rakenteella US3, mutta vuodenaikojen mukainen vaihtelu oli aavistuksen pienempää.

**Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla**



**Kuva 3.28** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Espoon eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

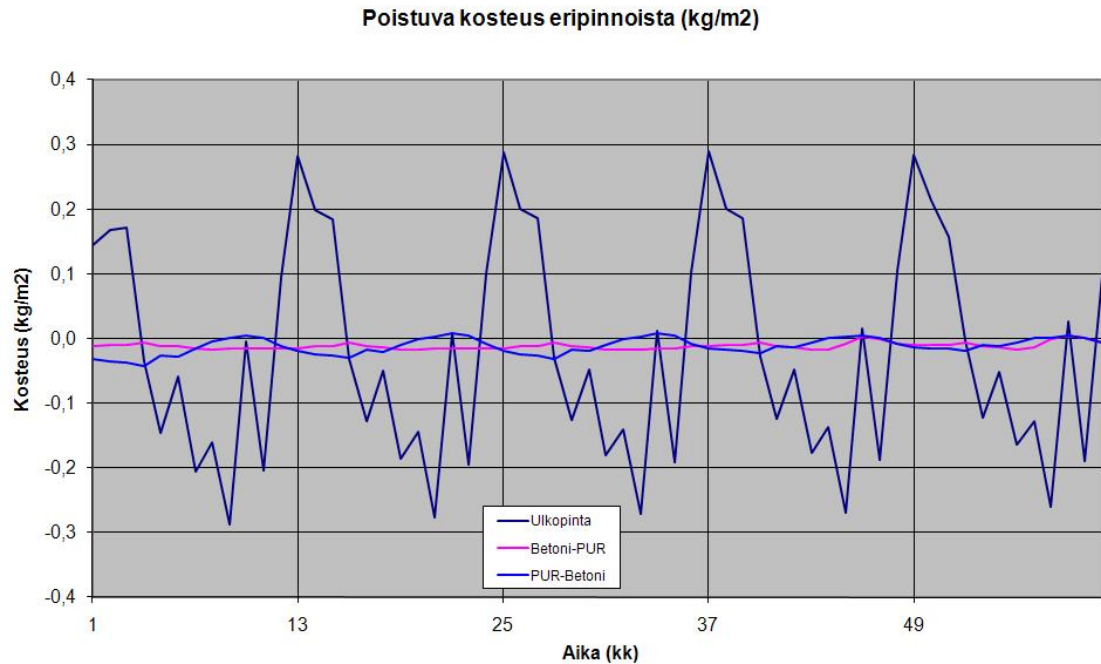


**Kuva 3.29** Kuvassa on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelua laskentajakson aikana Espoon nollajulkisivulle pisteessä P2. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

### 3.2.4.1 US4 Karasjoen ilmastossa

Karasjoen koillisjulkisivulla erirajapinnoista poistuvaa kosteutta kuukausitasolla on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.30). Eniten kosteutta kerääntyi ulkopintaan lokakuussa ja vastaavasti eniten kosteutta poistui kesäkuussa. Sisemmissä rajapinnoissa kosteuden liikkeet olivat pienempiä kuin ulkopinnassa. Laskentajakson aikana eristeen rajapinnoissa kosteuden kerääntymistä ei juuri tapahtunut.





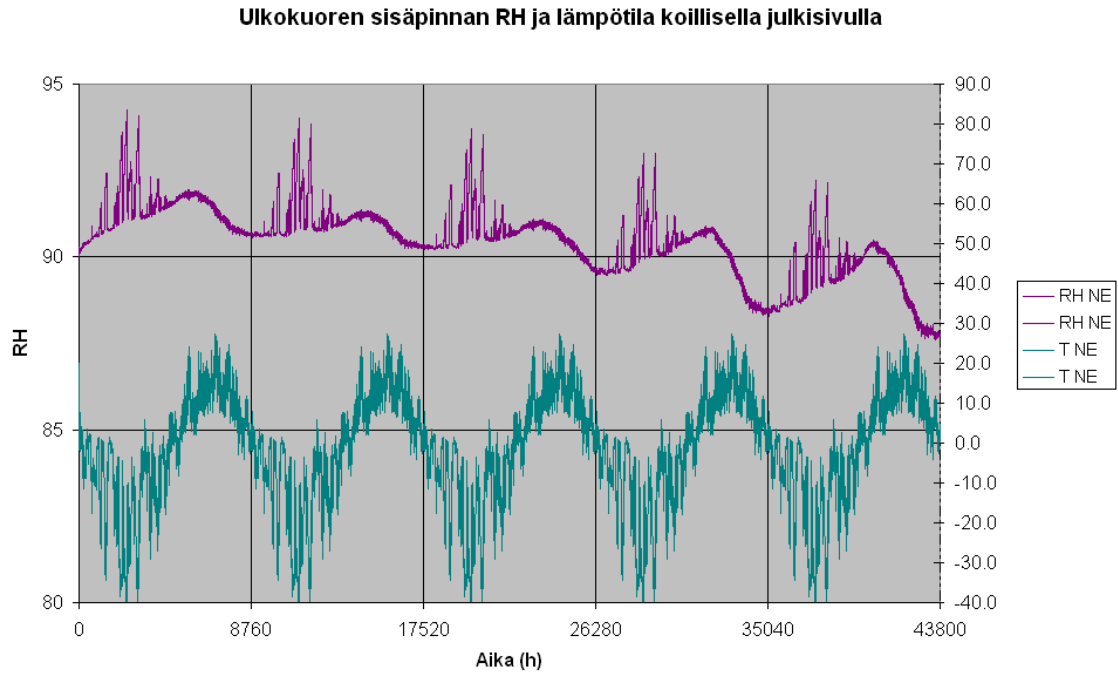
**Kuva 3.30** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Vuositasolla eri rajapinnoissa tapahtuvaa kosteuden kerääntymistä ja poistumista on esitetty taulukossa (Taulukko 3.19). Eniten kosteutta poistui ulkopinnasta sisäpintojen kosteuden poistumisen jäädessä pienemmäksi. Laskentajakson aikana ulkokuoresta poistui saman verran kosteutta kuin Espoon eteläjulkisivuun kerääntyy (Taulukko 3.17). Espoon pohjoiseen julkisivuun verrattuna tulokset olivat hyvin samansuuntaisia, mutta poistuva kosteus oli hieman suurempi.

**Taulukko 3.19** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun tapauksessa eri rajapinnoista vuosittain poistuva tai kerääntyvä kosteus kilogrammoina neliötä kohden. Taulukossa on esitetty kokonaiskosteusvirta sekä sen diffuusivinen ja kapillaarinen osuus.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - PUR (kg/m <sup>2</sup> )			PUR - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-0,970	0,446	-0,524	-0,066	-0,095	-0,161	-0,219	-0,004	-0,222
<b>2 vuosi</b>	-0,685	0,446	-0,239	-0,067	-0,101	-0,168	-0,151	0,008	-0,143
<b>3 vuosi</b>	-0,646	0,446	-0,200	-0,066	-0,097	-0,163	-0,151	0,008	-0,143
<b>4 vuosi</b>	-0,623	0,446	-0,177	-0,057	-0,053	-0,110	-0,106	0,001	-0,105
<b>5 vuosi</b>	-0,587	0,446	-0,141	-0,054	-0,037	-0,091	-0,088	0,000	-0,088
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-1,281</b>			<b>-0,694</b>			<b>-0,701</b>

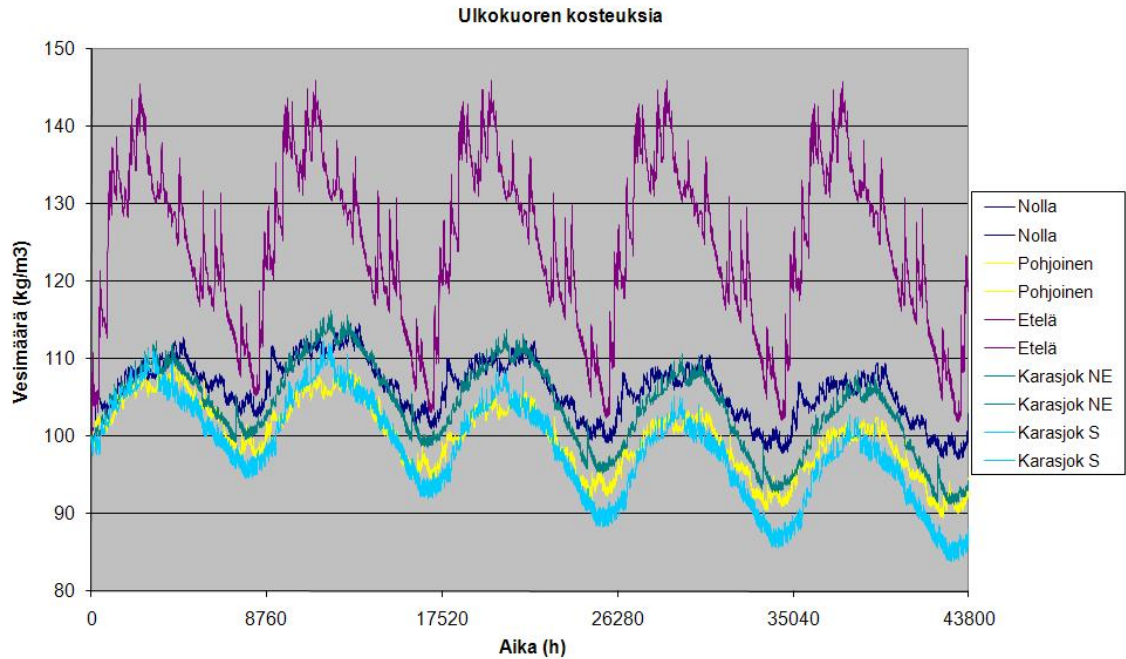
Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä pisteessä P2 (Kuva 3.31) tarkasteltiin koillisjulkisivulla. Suhteellinen kosteus alkoi hienoisesti laskea ensimmäisestä vuodesta alkaen, mutta vasta kolmannen vuoden jälkeen tuli selvempi pudotus etenkin vuositasen minimikosteuteen.



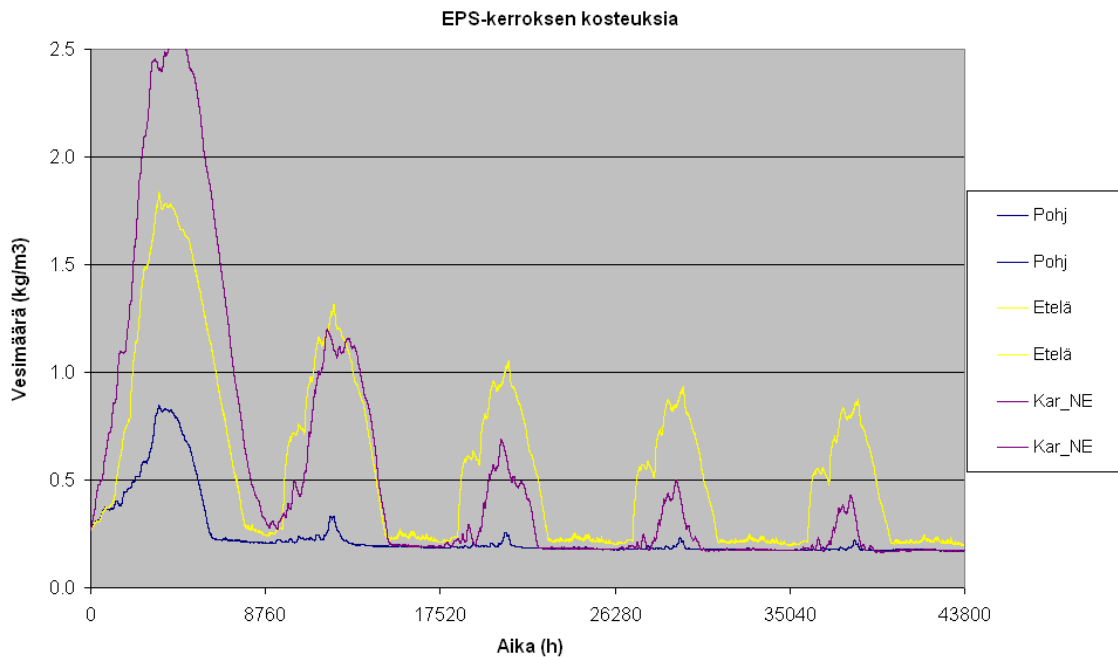
**Kuva 3.31** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä pisteessä P2 Karasjoen koillisjulkisivulla.

### 3.2.5. Rakennetyyppi US5a ja US5b

Rakennetyyppi US5 edustaa vuoden 2010 määräykset täyttävää rakennetta, jossa eristeenä on ns. harmaa EPS urilla tai ilman. Laskelmissa rakenne käsiteltiin tuulettumattomana, mutta tuulettamana laskettujen tulosten pohjalta tehtiin arvio tuuletuksen vaikutuksesta. Kuvassa (Kuva 3.32) on esitetty rakennetyypin US5 ulkokuoren keskimääräisiä kosteuksia eri laskentatapauksille. Kuten aikaisemmissakin rakennetyypeissä, myös nyt Espoon eteläinen pysyi kosteimpana eikä netto kuivumista juuri tapahtunut laskentajakson aikana. Karasjoen eteläinen ja Espoon pohjoinen julkisivu pysyivät kuivimpina laskentajakson aikana. Karasjoen koillisjulkisivu sekä nollajulkisivu saavuttivat kosteuden maksiminsa vasta toisena vuotena, jonka jälkeen alkoi vuosittainen kuivuminen.



**Kuva 3.32** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US5 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009. 1 vuosi = 8760 h.

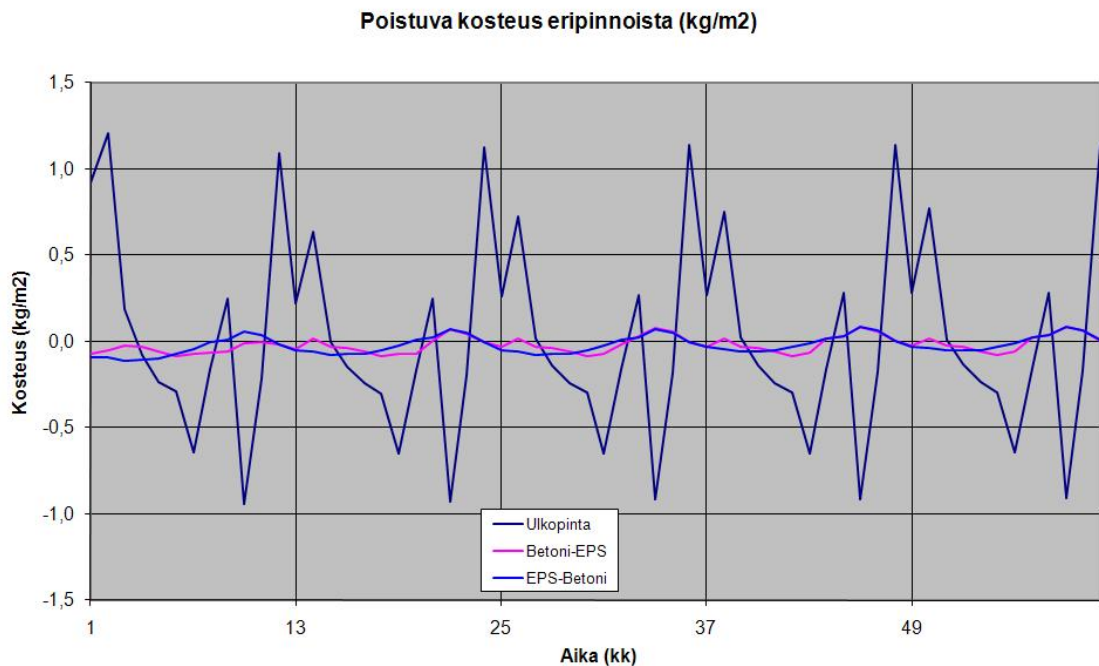


**Kuva 3.33** Kuvassa on esitetty EPS:n keskimääräisiä kosteuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) erälle laskentatapauksille ilman tuuletusta. Kohdassa 3.1.2.2 tehdyn kosteuskapasiteetti käytän korjauksen johdosta maksimiarvot selvästä todellisuutta suurempia etenkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

EPS-kerroksen kesimääräistä kosteuspitoisuutta laskentajakson aikana on esitetty kuvassa (Kuva 3.33). Jälleen suurimmat kosteudet ovat liioiteltuja kosteuskapasiteetti käyrään tehtyjen muutosten johdosta (kohta 3.1.2.2). Kaikilla ilmansuunnilla rakenne

kuitenkin kuivui alkutilanteeseen nähden. Espoon eteläjulkisivu oli kuitenkin vielä laskentajakson lopussa maksimikosteuden osalta märempi kuin mitä todellinen EPS:n kosteuskapasiteetti antoi myöden. Kesällä minimi kosteus oli kaikilla rakenteilla lähes sama.

Espoon eteläisen julkisivun eri rajapinnoista tapahtuvia kosteusvirtoja on esitetty kuvassa (Kuva 3.34). Syyskuussa ulkopintaan kerääntyi eniten kosteutta syyssateiden johdosta ja vastaavasti heinäkuussa rakenteesta poistui eniten kosteutta. Eristeen sisä- ja ulkopinnassa kosteusvirrat olivat pääasiassa ulospäin ja suuruudeltaan huomattavasti pienempiä kuin ulkokuoren ulkopinnan. Eristeen sisäpinnassa kosteusvirran suunta kääntyi kesäkuukausien ajaksi sisäänpäin ja muuttui syksyllä takaisin ulospäin suuntautuvaksi.



**Kuva 3.34** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Vuositasolla eri rajapinnoista poistuvaa ja kerääntyvää kosteutta on esitetty taulukossa. Laskentajakson viimeisenä vuotena poistuvan kosteuden määrä rajapinnasta riippuen oli 50 g/m<sup>2</sup>/vuosi tason molemmiin puolin. Ulkokuoren ulkopinnassa laskentajakson aikana rakenteeseen virtasi n. 350 g/m<sup>2</sup> lisää vettä ja eristeen rajapinnoista vastaavasti kosteutta virtasi ulos hieman yli 1 kg/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 3.20** Taulukossa on esitetty eteläisen julkisivun kapillaarisesti ja diffuusiolla tapahtuvia kosteusvirtoja ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ) eri rajapinnoissa sekä vuositason kokonaismäärää netto kosteusvirralle ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ). Tuuletusta ei huomioitu taulukon arvoissa.

	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni -EPS ( $\text{kg/m}^2$ )			EPS - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-21,468	22,557	1,088	-0,101	-0,435	-0,535	-0,429	-0,100	-0,529
2 vuosi	-22,152	21,758	-0,394	-0,061	-0,205	-0,265	-0,259	0,000	-0,259
3 vuosi	-22,041	21,852	-0,189	-0,050	-0,096	-0,146	-0,259	0,000	-0,259
4 vuosi	-21,991	21,890	-0,102	-0,043	-0,038	-0,081	-0,084	0,004	-0,081
5 vuosi	-21,966	21,908	-0,058	-0,040	-0,009	-0,049	-0,052	0,003	-0,048
Poistuva kosteus/rajapinta:			0,346			-1,077			-1,177

Tuuletuksen kosteuden poistoa on arvioitu kuten rakennetyypille US2 (ks. kohta 3.2.2) ja tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 3.21) Espoon eteläiselle sekä nollajulkisivulle. Espoon eteläiselle julkisivulla tuuletuksen poistama kosteus oli noin kolminkertainen verrattuna nollajulkisivuun. Tehokkaimmin tuuletus toimi heinäkuussa, jolloin rakenteesta poistui hieman yli 20 % koko vuoden tuuletuksella poistuvasta kosteudesta. Vuositasolla eteläisellä julkisivulla laskennassa käytetty uritus 25 x 27 (syvyys mitassa huomioitu 6 mm painuma) mm k150 poistaa eteläisellä julkisivulla noin  $260 \text{ g/m}^2$  kosteutta virtausnopeuden ollessa 0,01 m/s.

Vertailun vuoksi taulukossa (Taulukko 3.22) on esitetty diffuusiolla koko rakenteen läpi tapahtuvaa kosteusvirtaa erilaisissa stationääritiloissa. Diffuusio virrat on laskettu kuukausittain ja olosuhteina on käytetty kuukauden keskiarvoja. Arvoista voidaan huomata, että kesä aikaan tuuletuksen poistama kosteus oli hieman suurempi kuin koko kosteusvirta rakenteen läpi ja vastaavasti talviaikaan hieman pienempi.

**Taulukko 3.21** Taulukossa on esitetty tuuletuksen poistama kosteus Espoon eteläisellä julkisivulla sekä nollajulkisivulla. Tuuletuksen poistamat kosteusmäärät arvioitiin Gertisin menetelmällä virtausnopeudella 0,01 m/s urituksen ollessa 25 x 27 mm k150.

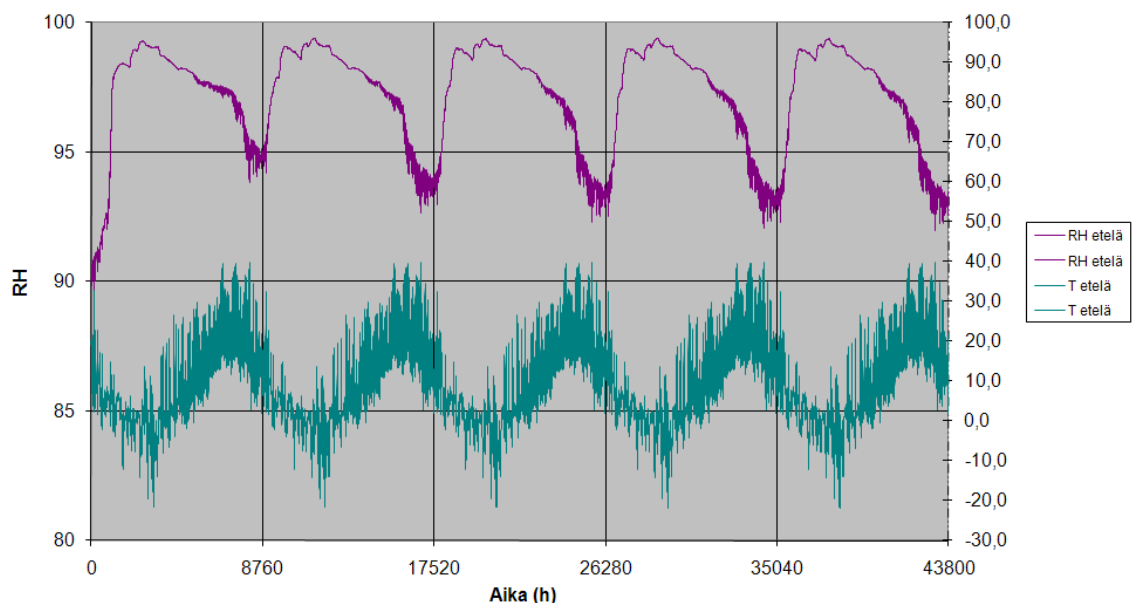
	Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla ( $\text{g/m}^2$ )						
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	18.7	16.4	30.8	24.6	13.1	29.7	133.2
2.vuosi	18.7	16.3	30.4	23.6	12.7	31.5	133.2
3.vuosi	18.7	16.2	30.1	23.3	12.5	31.1	131.9
4.vuosi	18.6	16.1	29.9	23.2	12.4	31.0	131.3
5.vuosi	18.6	16.1	29.8	23.2	12.4	30.9	131.0
	Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla ( $\text{g/m}^2$ )						
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	8.1	6.1	11.0	6.7	4.0	10.4	46.3
2.vuosi	7.9	5.6	10.5	6.3	3.7	11.2	45.2
3.vuosi	7.5	5.3	10.0	5.8	3.4	9.8	41.9
4.vuosi	7.3	5.0	9.7	5.5	3.2	8.8	39.5
5.vuosi	7.2	4.8	9.5	5.4	3.1	8.1	38.1

**Taulukko 3.22** Taulukossa on esitetty vertailun vuoksi erilaisissa stationääritilanteissa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa ( $\text{g/m}^2\text{kk}$ ). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ja EPS:lle  $4,72 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

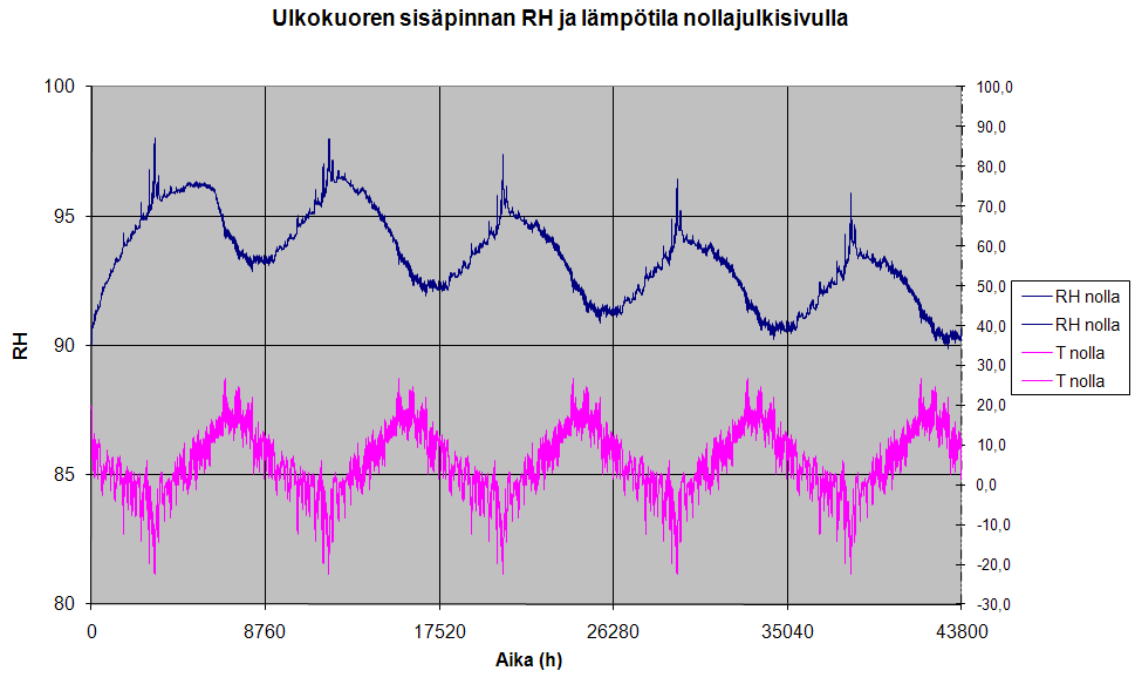
	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Olosuhteet	7.74	0.69	12.37	0.79	17.43	0.74	16.54	0.81	10.21	0.82	0.15	0.87
<b>g (<math>\text{g/m}^2\text{kk}</math>)</b>	9.37		6.29		7.40		5.33		5.71		64.59	

Suhteellista kosteutta tarkasteltiin eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa (Piste P2) Espoon eteläisellä (Kuva 3.35) ja nollajulkisivulla (Kuva 3.36). Eteläisellä julkisivulla suhteellinen kosteus oli lähes koko talven kondenssin rajamailla tai yli (tarkasteluissa kondenssirajana käytetty 97..98 % RH) ja laski loppukesästä alle 95 %. Eteläisellä julkisivulla suhteellisen kosteuden maksimissa ei ollut havaittavissa muutosta, mutta alin suhteellinen kosteus pieneni laskentajakson loppua kohden. Nollajulkisivulla suhteellinen kosteus saavutti maksiminsa keväällä ja lähti sen jälkeen laskuun ja on pienimmillään syyskuussa. Kahden ensimmäisen vuoden jälkeen nollajulkisivulla suhteellinen kosteus pysyi lähes koko ajan alle 95 %.

**Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla**



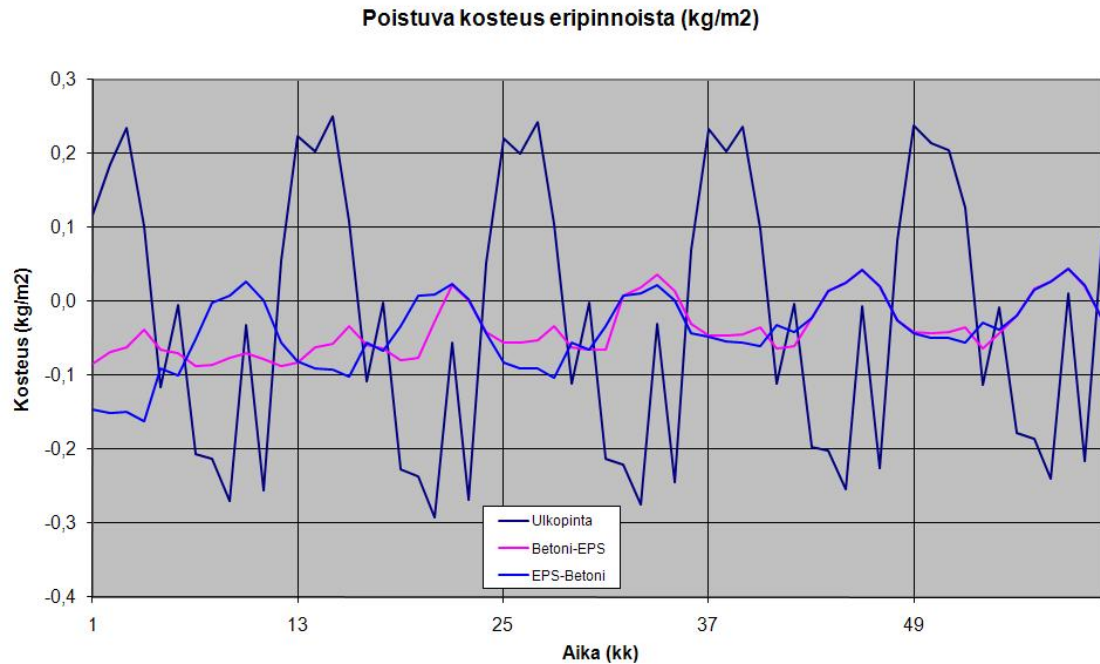
**Kuva 3.35** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Espoon eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.



**Kuva 3.36** Oheisessa kuvassa on esitetty suhteellinen kosteus ja lämpötila pisteessä P2 Espoon nollajulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.

### 3.2.5.1 US5 Karasjoen ilmastossa

Karasjoella eri rajapinnoista poistuvan kosteuden määrää on havainnollistettu kuvassa (Kuva 3.37). Ulkopintaan kosteutta kerääntyy eniten lokakuusta tammikuun loppuun saakka, joka kuitenkin kuivui kesä kuukausina. Rakenteen sisemmissä rajapinnoissa (pisteet P2 ja P5) ei tapahtunut merkittävää kosteuden kerääntymistä laskentajakson aikana. Pisteeseen P2 kosteutta kerääntyi laskentajakson loppupuolella aina kesäisin toukokuusta elokuuhun. Kerääntyvän kosteuden määrä oli n.  $20 \text{ g/m}^2/\text{kk}$  pisteessä sekä pisteessä P2 että P5.



**Kuva 3.37** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuehto oli 1.10.2009.

Vuositasolla koillisjulkisivun eri rajapinnoista poistuvaa kosteutta on esitelty taulukossa (Taulukko 3.23). Kaikissa rajapinnoissa vuositasolla kosteutta siirtyi enemmän ulospäin kuin sisään päin. Sisemmistä rajapinnoista (pisteet P2 ja P5) kosteutta siirtyi ulospäin enemmän kuin rakenteen ulkopinnasta. Pisteissä P2 ja P5 ulospäin pyrkivän kosteuden määrä tipahti tasosta 870 g/m<sup>2</sup>/vuosi tasoon 200 g/m<sup>2</sup>/vuosi laskentajakson aikana.

**Taulukko 3.23** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivulta eri rajapinnoista poistuvaa kosteutta vuositasolla (kg/m<sup>2</sup>/vuosi), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen luku tarkoittaa sisältä ulospäin pyrkivää kosteutta.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - EPS (kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-0,848	0,446	-0,401	-0,230	-0,641	-0,871	-0,810	-0,059	-0,869
<b>2 vuosi</b>	-0,797	0,446	-0,350	-0,151	-0,403	-0,554	-0,518	-0,001	-0,519
<b>3 vuosi</b>	-0,704	0,446	-0,257	-0,132	-0,210	-0,342	-0,518	-0,001	-0,519
<b>4 vuosi</b>	-0,592	0,446	-0,145	-0,121	-0,119	-0,240	-0,236	0,000	-0,236
<b>5 vuosi</b>	-0,509	0,446	-0,063	-0,113	-0,088	-0,201	-0,197	0,000	-0,197
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-1,218</b>			<b>-2,208</b>			<b>-2,340</b>

Karasjoella tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä samoin oletuksin kuin aikaisemmin. Tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 3.24). Eteläisellä julkisivulla tuuletuksen poistama kosteus oli 30...50 g/m<sup>2</sup>/vuosi suurempi kuin koillisjulkisivulla. Tehokkaimmin kosteutta poistui touko- ja heinäkuussa molemmissa tapauksissa. Esimerkiksi koillisjulkisivulla toukokuussa tuuletuksen poistama kosteusmäärä oli suurempi kuin lokakuusta huhtikuun loppuun kestäväällä jaksolla poistuva kosteus.



**Taulukko 3.24** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä arvioitua tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta Karasjoella sekä koillis- että eteläjulkisivulla. Laskelmissa virtausnopeutena käytettiin 0,01 m/s urituksen ollessa 25 x 27 mm k150.

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus koillisella julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
<b>1.vuosi</b>	8.1	5.4	9.5	5.7	2.8	5.7	<b>37.2</b>
<b>2.vuosi</b>	8.4	5.5	9.0	5.1	2.4	6.9	<b>37.2</b>
<b>3.vuosi</b>	7.6	4.6	8.2	4.4	2.1	6.0	<b>33.1</b>
<b>4.vuosi</b>	7.2	4.2	7.7	4.0	1.9	5.1	<b>30.0</b>
<b>5.vuosi</b>	6.9	3.9	7.3	3.5	1.7	4.5	<b>27.7</b>

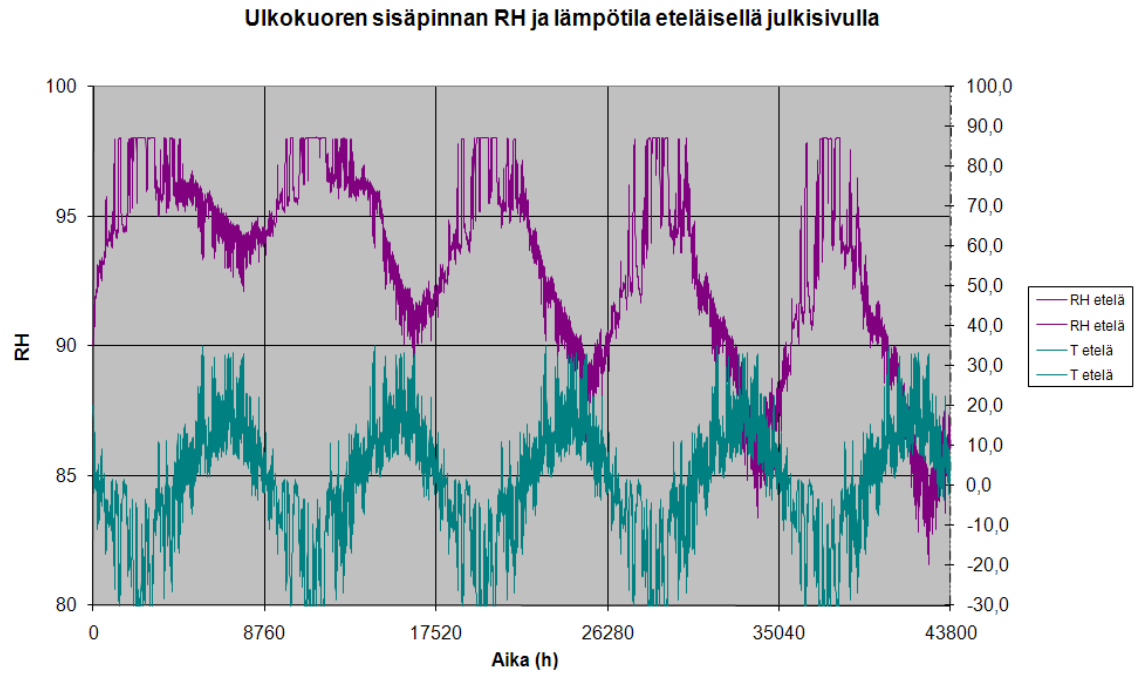
  

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
<b>1.vuosi</b>	12.0	7.4	12.2	10.2	4.9	12.9	<b>59.6</b>
<b>2.vuosi</b>	12.0	7.0	11.1	9.1	4.3	13.4	<b>56.9</b>
<b>3.vuosi</b>	11.0	6.1	10.1	8.1	3.8	12.3	<b>51.4</b>
<b>4.vuosi</b>	10.4	5.5	9.0	6.9	3.4	11.2	<b>46.4</b>
<b>5.vuosi</b>	10.0	4.9	8.1	6.1	3.0	10.4	<b>42.5</b>

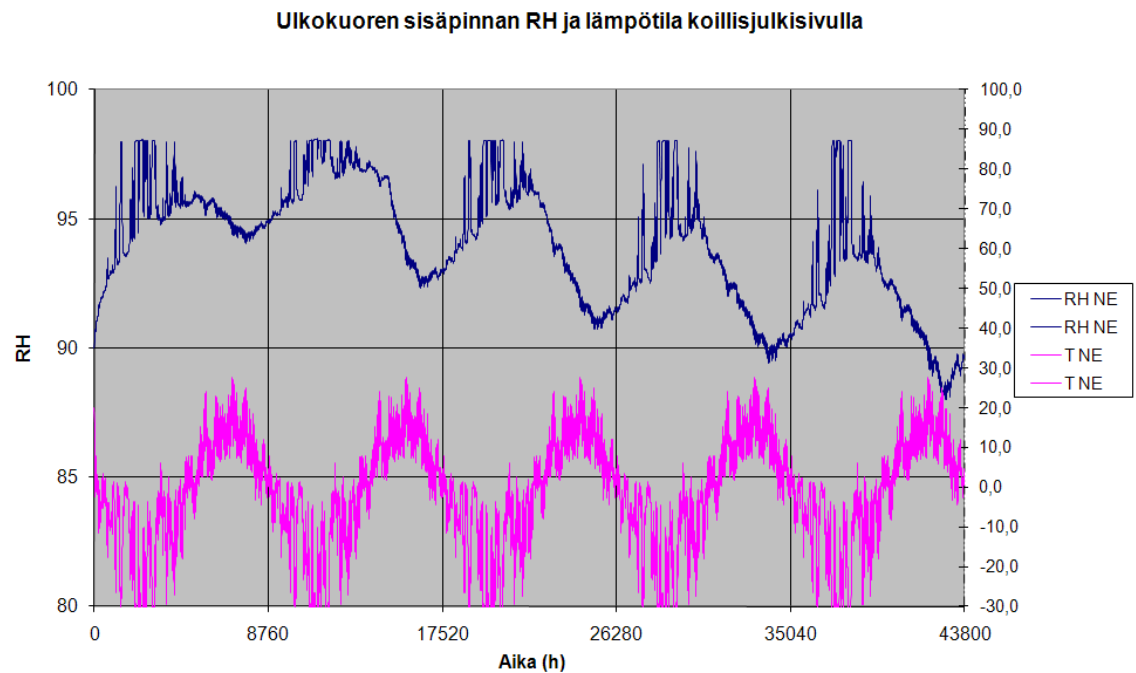
Suhteellista kosteutta tarkasteltiin pisteessä P2 sekä koillis- että eteläjulkisivulla. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.38) suhteellisen kosteuden minimi pieneni laskentajakson loppua kohti ollen viimeisenä tarkastelu vuotena pienimmillään 82 %. Suhteellisen kosteuden maksimi sen sijaan oli hieman yli 98 %, ja se toistui vuosittain. Tosin aika, jona tämä maksimi esiintyi, lyheni joka vuosi.

Suhteellisen kosteuden maksimista on syytä huomata, että siinä näkyy laskentaan tehty EPS:n kosteuskapasiteetin ylärajan muutos numeerisista syistä (ks. kohta 3.1.2.2). Siinä missä suhteellinen kosteus 98 % tarkoittaa, että EPS:ssä on kosteutta 0,48 kg/m<sup>3</sup> on jo 98,06 % suhteellisella kosteudella muutoksen jälkeen EPS:ssä kosteutta 1,8 kg/m<sup>3</sup>. Tämän vuoksi suhteellisen kosteuden käyrissä yläraja näyttää tasaiselta 98 % kohdalla.

Koillisjulkisivulla (Kuva 3.39) tilanne oli samankaltainen eteläisenjulkisivun kanssa, suhteellisen kosteuden vuosittainen minimi pieneni laskentajakson loppua kohden ollen pienimmillään noin 88 %. Maksimi suhteellinen kosteus oli hieman yli 98 % ja laskentajakson loppua kohden aika, jona maksimi suhteellinen kosteus esiintyi, lyheni.



**Kuva 3.38** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Karasjoen eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.



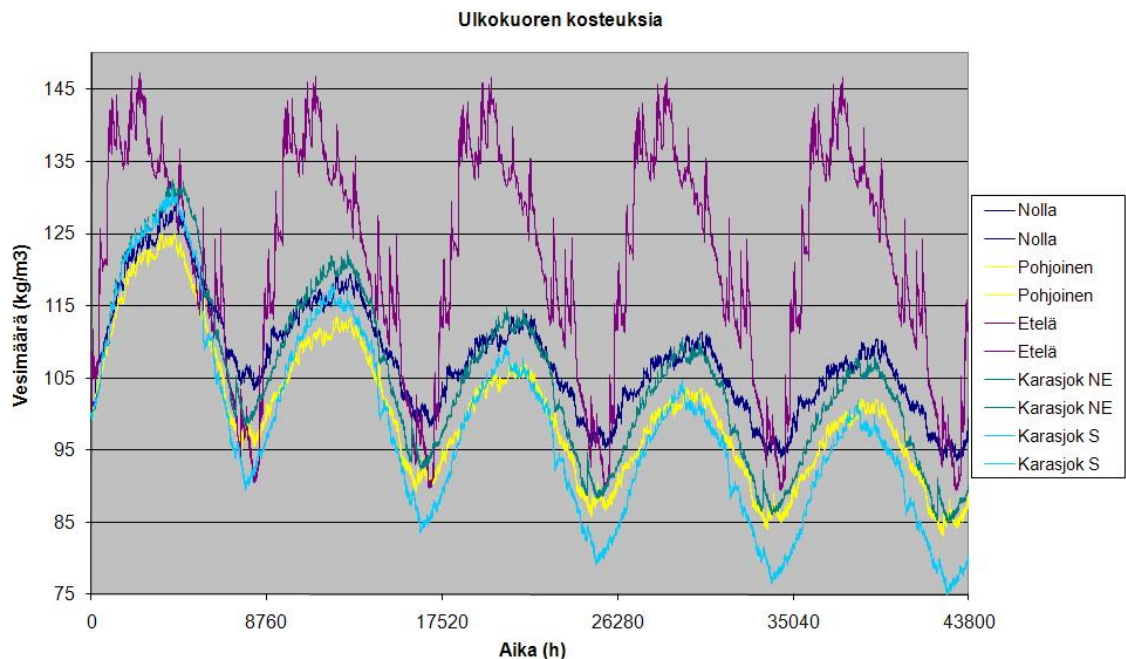
**Kuva 3.39** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Karasjoen koillisjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

### 3.2.6. Rakennetyyppi US6

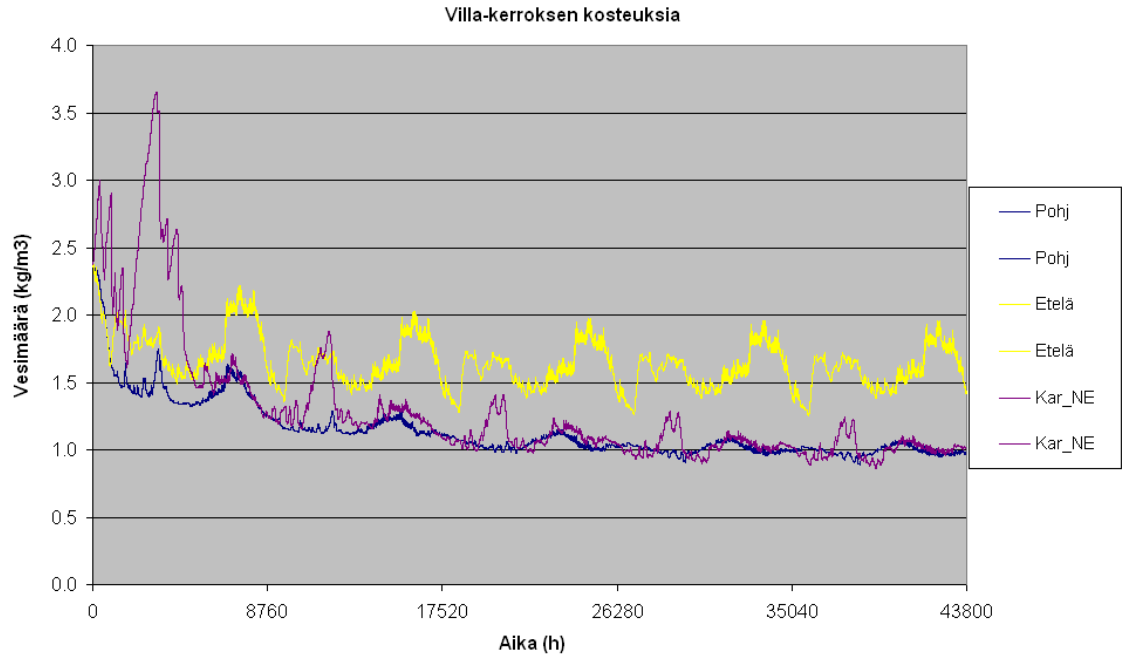
Rakennetyyppi US6 on uritetulla villalla varustettu BSW-rakenne, jonka lämmöneristyskyky täyttää vuoden 2010 määräykset. Laskennassa rakenetta tarkasteltiin kuitenkin tuulettumattomana, mutta erillinen tuulettuvuustarkastelu tehtiin tuulettumattoman rakenteen tulosten perusteella.

Rakennetyypin US6 ulkokuoren keskimääräisiä vesipitoisuuksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.40). Eteläinen julkisivu oli koko laskentajakson ajan kosteimpana, eikä vuosittainen maksimi vesimäärä muuttunut laskentajakson aikana, sen sijaan vuosittainen minimi vesimäärä pieneni laskentajakson loppua kohden. Muilla tarkastelluilla julkisivuilla vesimäärät pienenivät laskentajakson loppua kohden. Kuivimpana laskentajakson lopussa oli Karasjoen eteläinen julkisivu, joskin talvikaudella maksimi vesimäärä nousi samoihin lukemiin Espoon pohjoisjulkisivun kanssa. Espoon eteläistä julkisivua lukuun ottamatta muut julkisivut olivat koko laskentajakson ajan hyvin lähellä toisiaan.

Villakerroksen keskimääräisiä vesipitoisuuksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.41). Villassa oleva vesimäärä pieneni kaikilla laskentatapauksilla, tosin Espoon eteläjulkisivulla pieneneminen oli vähäisintä. Karasjoen koillis- ja Espoon pohjoisjulkisivu kuivuivat laskennan aikana lähelle samaa tasoa, tosin Karasjoella talviaikaan villa kostui enemmän kuin Espoossa. Muutenkin Karasjoella vuoden sisäinen vaihtelu vesimäärässä oli suurempi.

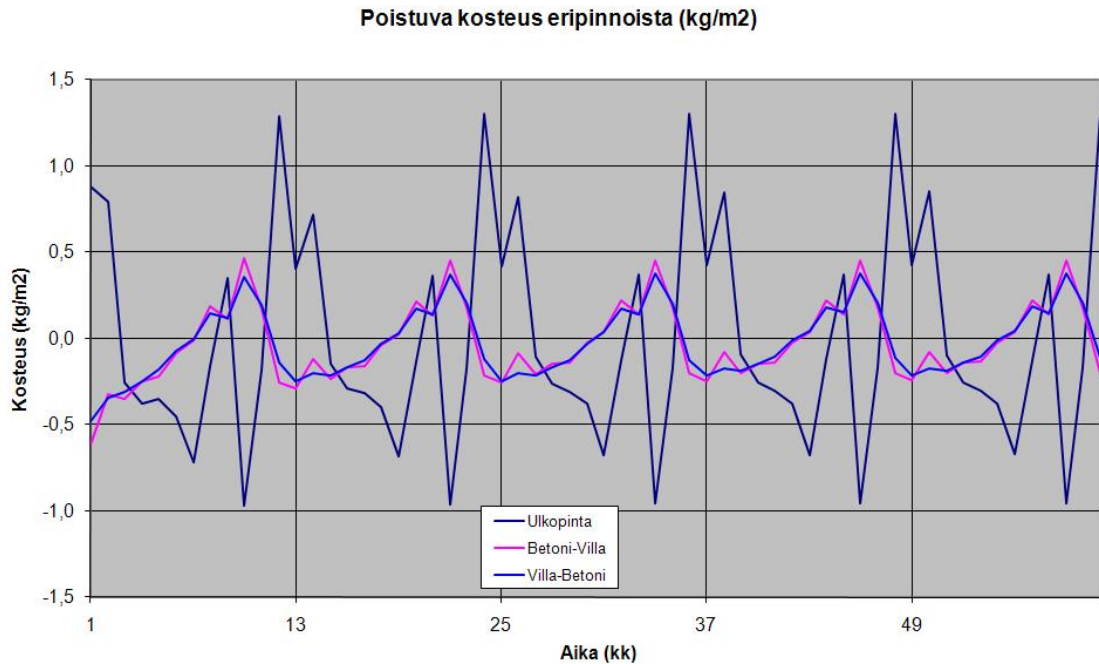


**Kuva 3.40** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US6 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuulettu ei ole huomioitu. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.



**Kuva 3.41** Kuvassa on esitetty villan keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia (kg/m<sup>3</sup>) julkisivun ollessa pohjoiseen ja etelään Espoossa sekä koilliseen Karasjoella, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Espoon eteläisellä julkisivulla eri rajapinnoista tapahtuvia kosteusvirtoja on esitetty kuukausittasolla kuvassa (Kuva 3.42). Ulkokuoren ulkopintaan eniten kosteutta kertyi syyskuussa ja vastaavasti heinäkuussa poistui eniten. Pisteitä P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa eniten kosteutta kertyi touko- ja heinäkuussa.



**Kuva 3.42** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Vuositasolla eri rajapinnoista poistuvaa kosteutta eteläisellä julkisivulla on esitetty taulukossa (Taulukko 3.25). Poistuvan kosteuden määrä tasoittui laskentajakson loppua kohden kaikissa rajapinnoissa ja laskennan viimeisenä vuotena eroa eri rajapintojen välillä oli enää suurimmillaan 4 g/m<sup>2</sup>/vuosi. Nollajulkisivulla (Taulukko 3.26) eri rajapinnoista poistuvat kosteudet olivat huomattavasti suuremmat, lähes kolminkertaiset, verrattuna eteläiseen julkisivuun. Laskentajakson lopussa kaikista rajapinnoista poistui vielä yli 250 g/m<sup>2</sup>/vuosi kosteutta määrän kasvaessa ulospäin, mikä tarkoittaa, että rakenne olisi kuivunut vielä laskentajakson päätyttyä aavistuksen.

**Taulukko 3.25** Taulukossa on esitetty Espoon eteläisen julkisivun kapillaarisesti ja diffuusiolla tapahtuvia kosteusvirtoja (kg/m<sup>2</sup>/vuosi) eri rajapinnoissa sekä vuositason kokonaismäärää netto kosteusvirralle (kg/m<sup>2</sup>/vuosi). Tuuletusta ei huomioitu taulukon arvoissa.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - Villa (kg/m <sup>2</sup> )			Villa - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
1 vuosi	-22,500	22,352	-0,149	2,217	-3,381	-1,164	-1,155	0,190	-0,966
2 vuosi	-22,494	22,196	-0,298	2,363	-2,577	-0,214	-0,424	0,248	-0,177
3 vuosi	-22,370	22,306	-0,064	2,349	-2,388	-0,039	-0,424	0,248	-0,176
4 vuosi	-22,338	22,336	-0,002	2,345	-2,341	0,004	-0,231	0,241	0,010
5 vuosi	-22,328	22,344	0,016	2,344	-2,328	0,017	-0,220	0,240	0,020
Poistuva kosteus/rajapinta:			-0,497			-1,397			-1,288

**Taulukko 3.26** Taulukossa on esitetty nollajulkisivulla kapillaarisesti ja diffuusiolla tapahtuvia kosteusvirtoja (kg/m<sup>2</sup>/vuosi) eri rajapinnoissa sekä vuositason kokonaismäärää netto kosteusvirralle (kg/m<sup>2</sup>/vuosi). Tuuletusta ei huomioitu taulukon arvoissa.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - Villa (kg/m <sup>2</sup> )			Villa - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
1 vuosi	-1,382	0,000	-1,382	0,091	-2,142	-2,050	-1,720	-0,054	-1,774
2 vuosi	-0,905	0,000	-0,905	0,278	-0,806	-0,528	-0,502	0,002	-0,500
3 vuosi	-0,524	0,000	-0,524	0,289	-0,605	-0,316	-0,501	0,002	-0,499
4 vuosi	-0,355	0,000	-0,355	0,269	-0,536	-0,268	-0,263	0,001	-0,262
5 vuosi	-0,289	0,000	-0,289	0,261	-0,516	-0,255	-0,253	0,001	-0,251
Poistuva kosteus/rajapinta:			-3,455			-3,416			-3,286

Tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä ja arvioinnin tuloksia on esitetty taulukossa (Taulukko 3.27) eteläiselle ja nollajulkisivulle. Eteläisellä julkisivulla tuuletuksella oli selvä vaikutus, sillä vielä laskenta jakson lopussakin uritus poisti kosteutta rakenteesta yli 0,5 kg/m<sup>2</sup>/vuosi. Nollajulkisivulla tuuletuksen vaikutus jäi pienemmäksi ollen noin kolmasosa eteläisen julkisivun vastaavasta. Kosteuden poiston kannalta tehokkaimmat kuukaudet olivat toukokuu ja heinäkuu. Nollajulkisivulla tuuletuksen kautta poistuva kosteus oli samaa suuruusluokkaa kuin diffuusion ja kapillaarivirtauksen kautta villan ulkokuoren rajapinnasta poistuva kosteus. Tuuletuksen vaikutusta eristetilän kosteusmääriin on arvioitu liitteessä C.

Vertailun vuoksi taulukossa (Taulukko 3.28) on esitetty koko rakenteen läpi meneviä kosteusvirtoja erilaisissa stationääritilanteissa. Tuuletuksen poistamiin kosteuksiin verrattuna diffuusiolla tapahtuvat kosteusvirrat olivat selkeästi pienempiä, etenkin kesäaikaan. Talviaikaan tuuletuksella poistuvat kosteusvirrat jäivät pienemmiksi kuin koko rakenteen läpi diffuusiolla kulkeva kosteusvirta.

**Taulukko 3.27** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä tehty arvio tuuletuksen kuivattavasta vaikutuksesta Espoon eteläisellä ja nollajulkisivulla. Laskelmissa virtausnopeutena oli 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150.

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	82.9	66.1	117.7	93.2	56.4	153.3	569.6
2.vuosi	82.0	64.8	114.8	90.2	54.6	151.4	557.9
3.vuosi	81.8	64.4	114.0	89.4	54.0	150.0	553.6
4.vuosi	81.7	64.3	113.7	89.1	53.9	149.6	552.2
5.vuosi	81.6	64.2	113.7	89.0	53.8	149.5	551.9

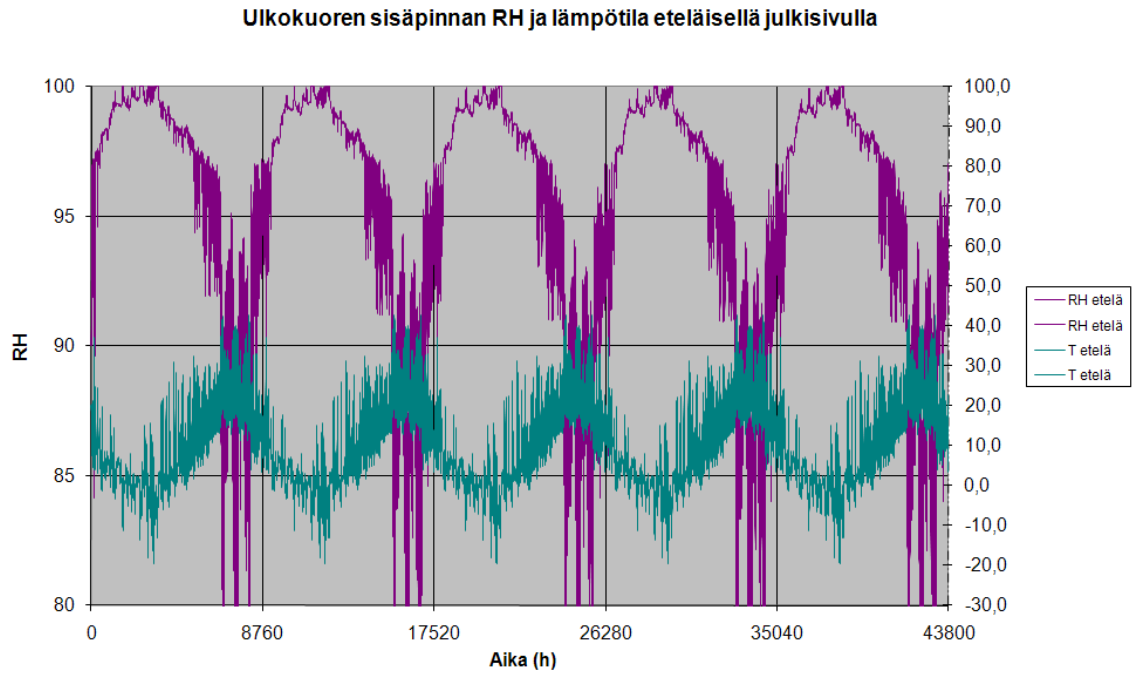
  

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	34.3	25.9	44.8	28.7	18.9	63.2	215.7
2.vuosi	32.5	22.0	39.7	23.7	15.5	56.7	190.2
3.vuosi	30.4	19.7	36.3	19.8	13.5	48.2	167.9
4.vuosi	29.5	18.6	34.0	17.4	12.5	42.8	154.8
5.vuosi	29.1	18.2	33.0	16.5	12.1	40.6	149.5

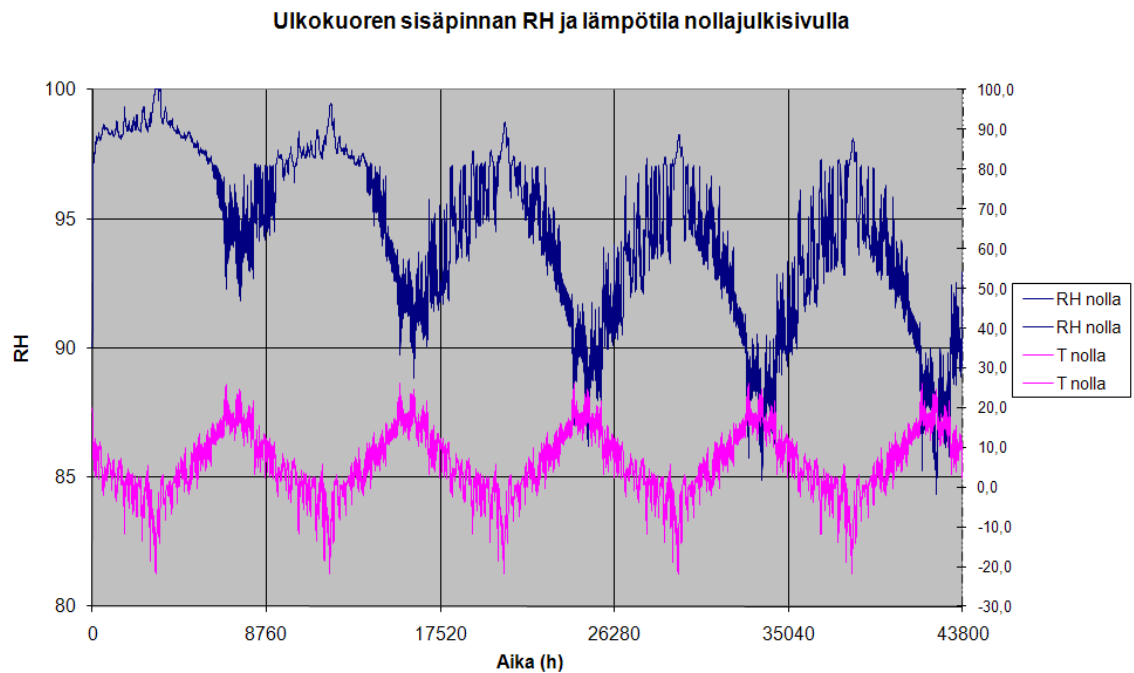
**Taulukko 3.28** Taulukossa on esitetty vertailun vuoksi erilaisissa stationääritilanteissa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa (g/m<sup>2</sup>kk). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ja villalle  $1,82 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Olosuhteet	7.74	0.69	12.37	0.79	17.43	0.74	16.54	0.81	10.21	0.82	0.15	0.87
g (g/m <sup>2</sup> kk)	13.48		9.05		10.64		7.67		8.21		92.89	

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkkailtiin pisteessä P2 sekä eteläisellä että nollajulkisivulla. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.43) suhteellinen kosteus kävi joka talvi 100 % ja kesällä suhteellisen kosteuden minimi pieneni laskentajakson loppua kohden. Kesäisin suhteellisessa kosteudessa oli havaittavissa voimakasta vaihtelua, kun suhteellinen kosteus vaihteli välillä 73..93 %. Nollajulkisivulla (Kuva 3.44) suhteellisen kosteuden maksimi ja minimi pienenevät laskentajakson loppua kohden. Laskentajakson parina viimeisenä vuotena suhteellisen kosteuden maksimi ei enää muuttunut merkittävästi, mutta minimi pieneni vielä jonkin verran. Talvella suhteellinen kosteus ei enää noussut kertaakaan 100 %, mutta vastaavasti kesällä ei juuri menty alle 85 %.



**Kuva 3.43** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon eteläisellä julkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.



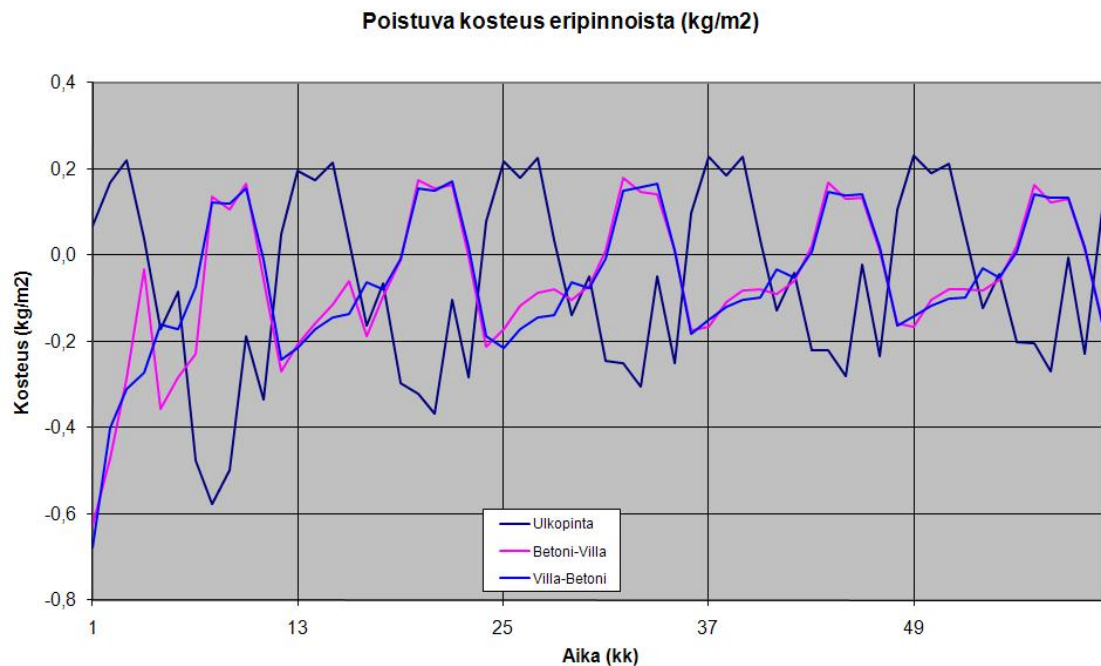
**Kuva 3.44** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon nollajulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.

### 3.2.6.1 US6 Karasjoen ilmastossa

Kuukausitasolla eri rajapinnoista Karasjoen koillisjulkisivulla tapahtuvia kosteusvirtoja on esitetty kuvassa (Kuva 3.45). Ulkopintaan eniten kosteutta kertyi lokakuussa ja vastaavasti poistui eniten kesäkuussa. Sisemmissä rajapinnoissa eniten kosteutta kertyi

kesäkuukausina ja eniten poistui syyskuussa ja lokakuussa. Laskentajakson parina viimeisenä vuotena eristeen sisä- ja ulkopinnoissa kosteusvirtojen muutokset tasaantuivat ja suurimmat ulospäin suuntautuvat kosteusvirrat asettuivat hieman alle 200 g/m<sup>2</sup>/kk.

Eri rajapinnoissa vuositason tapahtuvaa kosteuden siirtymistä on havainnollistettu taulukossa (Taulukko 3.29) ilman tuuletuksen vaikutuksen huomioimista. Laskentajakson lopussa eri rajapinnoista poistuvat kosteusvirrat tasaantuivat välille 260...290 g/m<sup>2</sup>/vuosi, kun laskennan ensimmäisenä vuotena poistuvat kosteusmäärät olivat molemmiin puolin 2 kg/m<sup>2</sup>/vuosi. Sisimmästä rajapinnasta poistui laskentajaksolla kaikkein vähiten kosteutta ja ulkopinnasta eniten. Laskentajakson aikana poistunut kosteus määrä kasvoi n. 150 g/m<sup>2</sup>/rajapinta sisältä ulospäin.



**Kuva 3.45** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.

**Taulukko 3.29** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivulla eri rajapinnoista vuositason poistuva ja kertyvä kosteus (kg/m<sup>2</sup>/vuosi), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen ulkoa sisäänpäin tapahtuvaa virtausta.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - Villa(kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Villa(kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-2,231	0,446	-1,785	0,646	-2,843	-2,197	-1,897	-0,022	-1,919
<b>2 vuosi</b>	-1,350	0,446	-0,904	0,664	-1,221	-0,557	-0,526	0,014	-0,512
<b>3 vuosi</b>	-0,975	0,446	-0,529	0,587	-0,899	-0,312	-0,525	0,014	-0,511
<b>4 vuosi</b>	-0,808	0,446	-0,362	0,516	-0,790	-0,274	-0,272	0,006	-0,265
<b>5 vuosi</b>	-0,732	0,446	-0,285	0,484	-0,750	-0,266	-0,264	0,005	-0,259
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-3,865</b>			<b>-3,605</b>			<b>-3,466</b>

Tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä ja arvioinnin tuloksia on esitetty taulukossa (Taulukko 3.30). Tehokkaimmin kosteutta poistui

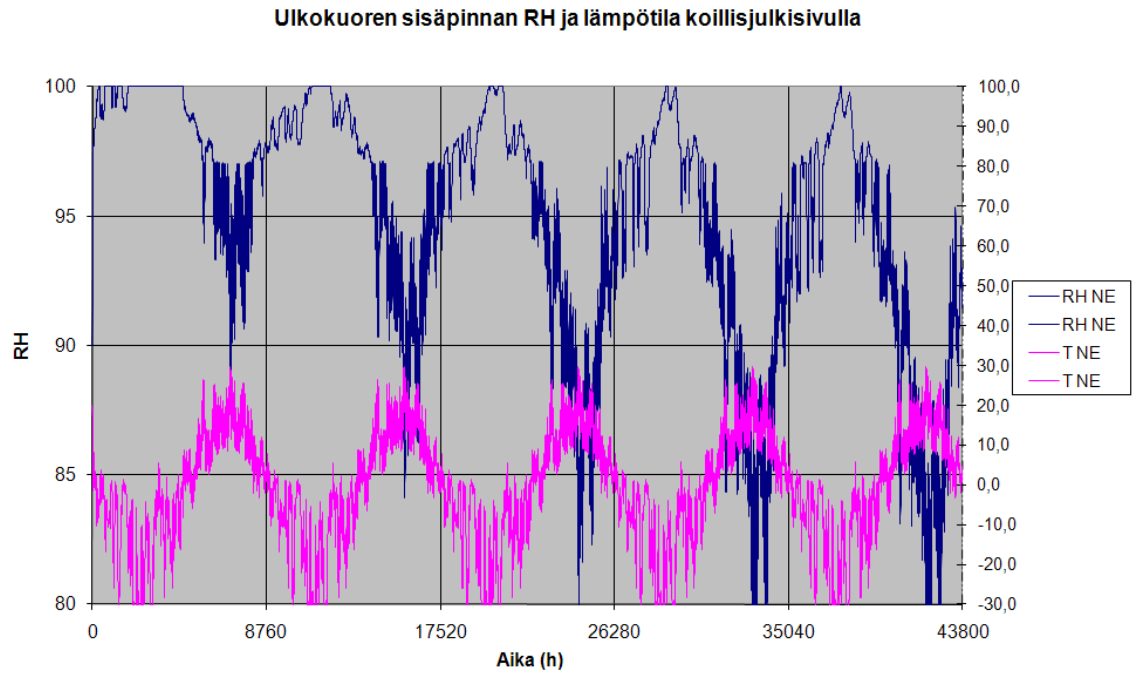


urituksen avulla toukokuussa ja heinäkuussa sekä koillis- että eteläjulkisivulla. Eteläjulkisivulla kosteutta poistui enemmän, lähes puolitoistakertainen määrä koillisjulkisivuun verrattuna. Verrattuna Espoon julkisivuihin Karasjoen koillisjulkisivulla tuuletuksen avulla saatiin aikaiseksi nollajulkisivua vastaava kosteuden poisto. Karasjoen eteläjulkisivu asettui kosteudenpoistoltaan Espoon eteläisen ja nollajulkisivun välimaastoon.

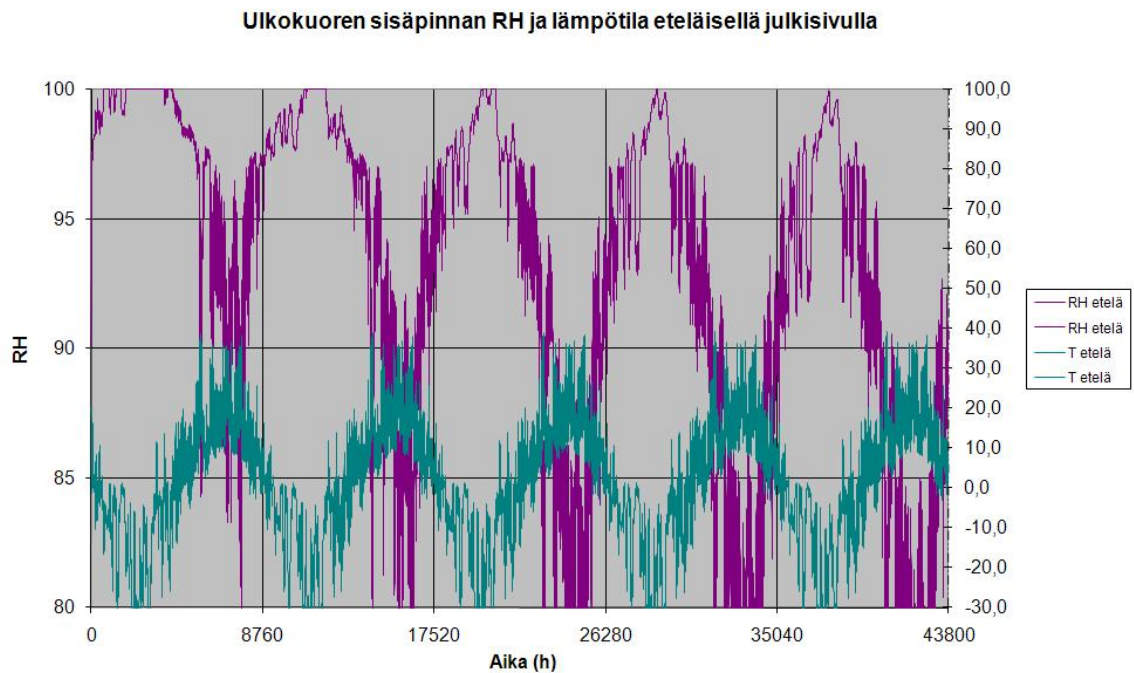
**Taulukko 3.30** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä arvioitua tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta ( $\text{g/m}^2/\text{kk}$  ja  $\text{g/m}^2/\text{vuosi}$ ) Karasjoella sekä koillis- että eteläjulkisivulla. Laskelmissa virtausnopeutena oli  $0,01 \text{ m/s}$  ja urituksena  $25 \times 27 \text{ mm k150}$ .

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus koillisella julkisivulla ( $\text{g/m}^2$ )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	43.8	34.8	51.6	33.1	16.4	42.1	221.8
2.vuosi	40.7	30.5	44.7	27.3	14.4	39.1	196.7
3.vuosi	37.2	26.5	37.8	21.5	12.6	35.7	171.3
4.vuosi	34.9	23.4	33.0	18.0	11.7	32.6	153.6
5.vuosi	33.6	21.7	30.3	16.2	11.2	30.9	144.0
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla ( $\text{g/m}^2$ )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	64.2	46.4	63.1	55.4	28.3	74.9	332.2
2.vuosi	58.8	40.3	53.1	45.1	24.9	72.0	294.2
3.vuosi	53.2	33.6	42.2	36.3	22.2	67.0	254.6
4.vuosi	49.0	28.5	35.4	31.1	20.5	62.5	227.0
5.vuosi	46.4	25.3	31.4	28.1	19.6	59.9	210.7

Suhteellista kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 on laskettu sekä koillis- että eteläjulkisivulla Karasjoen ilmastossa. Koillisjulkisivulla (Kuva 3.46) laskentajakson aikana suhteellisen kosteuden maksimi kävi vuosittain  $100 \%$  tasolla, mutta laskentajakson loppua kohden aika, jona maksimikosteudessa oltiin, lyheni. Vastaavasti suhteellisen kosteuden vuosittainen minimi pieneni ja viimeisenä laskenta vuotena saavutti pienimmillään  $75 \%$  suhteellisen kosteuden. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.47) suhteellinen kosteus käyttäytyi samalla tavalla kuin koillisessa, mutta laskentajakson aikana minimi suhteellinen kosteus oli  $62 \%$ . Varsinkin kesä aikaan eteläjulkisivulla suhteellisen kosteuden vaihtelut olivat suuremmat kuin koillisjulkisivulla.



**Kuva 3.46** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen koillisjulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.

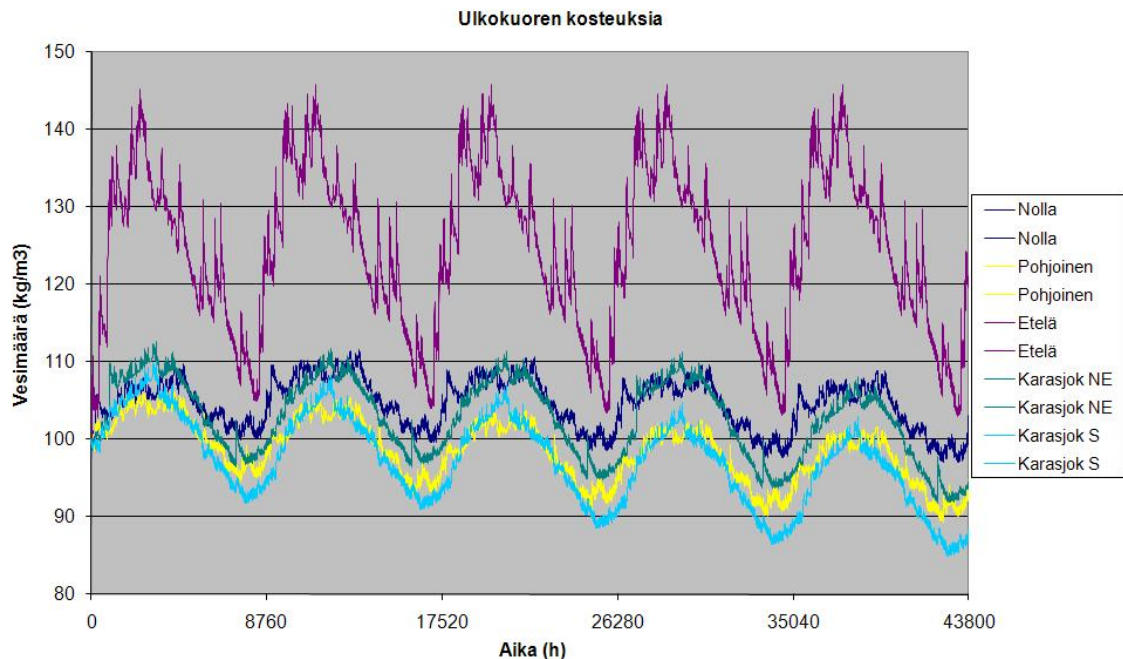


**Kuva 3.47** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen eteläjulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.

### 3.2.7. Rakennetyyppi US7a ja US7b

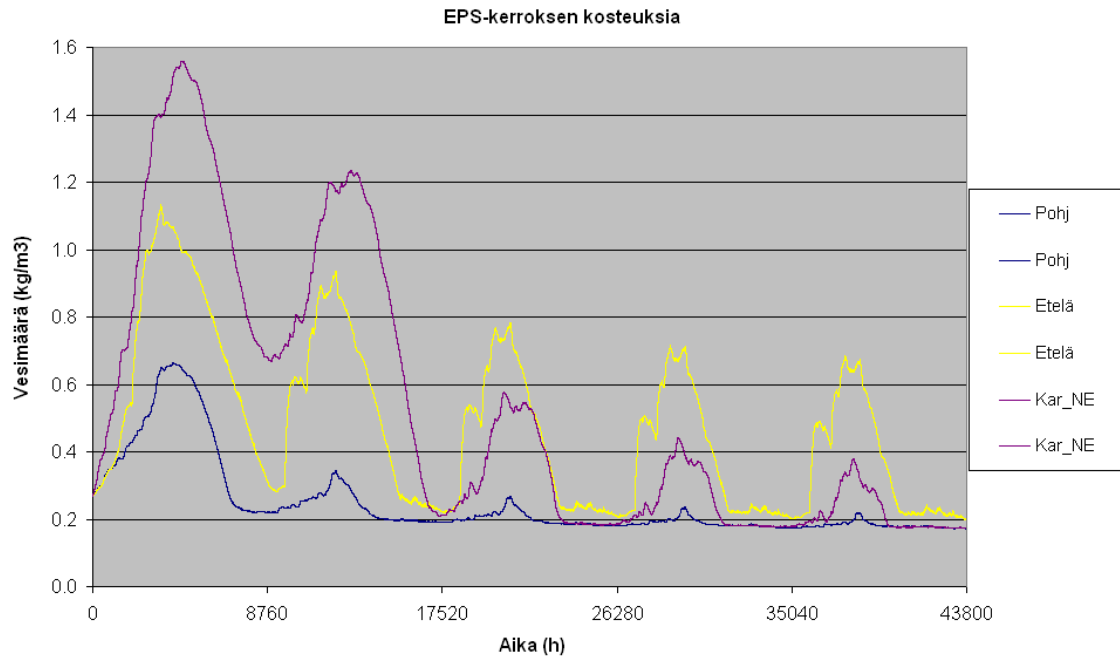
Rakennetyyppi US7 edustaa vuoden 2010 määräykset täyttävää EPS-eristeistä BSW-rakennetta. Laskelmissa rakenne käsiteltiin tuulettumattomana, mutta tuulettumattoman rakenteen tulosten perusteella tehtiin erillinen tuulettuvuustarkastelu.

Rakennetyypille US7 ulkokuoren keskimääräisiä vesipitoisuuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) eri laskentatapauksissa on esitetty kuvassa (Kuva 3.48). Eteläinen julkisivu pysyi kosteimpana koko laskentajakson ajan ja sen vuosittainen maksimikosteus oli suunnilleen sama koko laskentajakson ajan. Minimi vesimäärä eteläisellä julkisivulla sen sijaan laski vuosien kuluessa ollen kuivimmillaan noin  $105 \text{ kg/m}^3$ . Muilla laskentatapauksilla vesimäärä laski laskennan loppua kohden. Karasjoen eteläjulkisivu oli laskennan päätyttyä kuivin ja Espoon pohjoisjulkisivu oli lähellä samoja lukemia. Karasjoen koillis- ja Espoon nollajulkisivu olivat keskenään lähes samanlaisia ja aavistuksen Espoon pohjoisjulkisivua kosteampia. Espoon eteläjulkisivu pois lukien kaikilla muilla julkisivuilla ulkokuoren keskimääräinen kosteus vähentyi laskentajakson aikana.



**Kuva 3.48** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US7 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuulelusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuehti oli 1.10.2009.

Eristekerroksen keskimääräisiä vesipitoisuuksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.49). Jälleen Espoon eteläjulkisivu jää kosteimmaksi laskentajakson lopussa Espoon pohjoisjulkisivun kuivuessa eniten. Eteläjulkisivulla talvisaikaan kosteuspitoisuus jäi edelleen suuremmaksi kuin todellisen kosteuskapasiteetti käyrän mukaan oli mahdollista. Muilla laskentatapauksilla laskennan viimeisinä vuosina vesimäärä pysyi todellisissa rajoissa eikä kesäajan minimikosteuksissa ollut suurta eroa eri julkisivujen välillä.

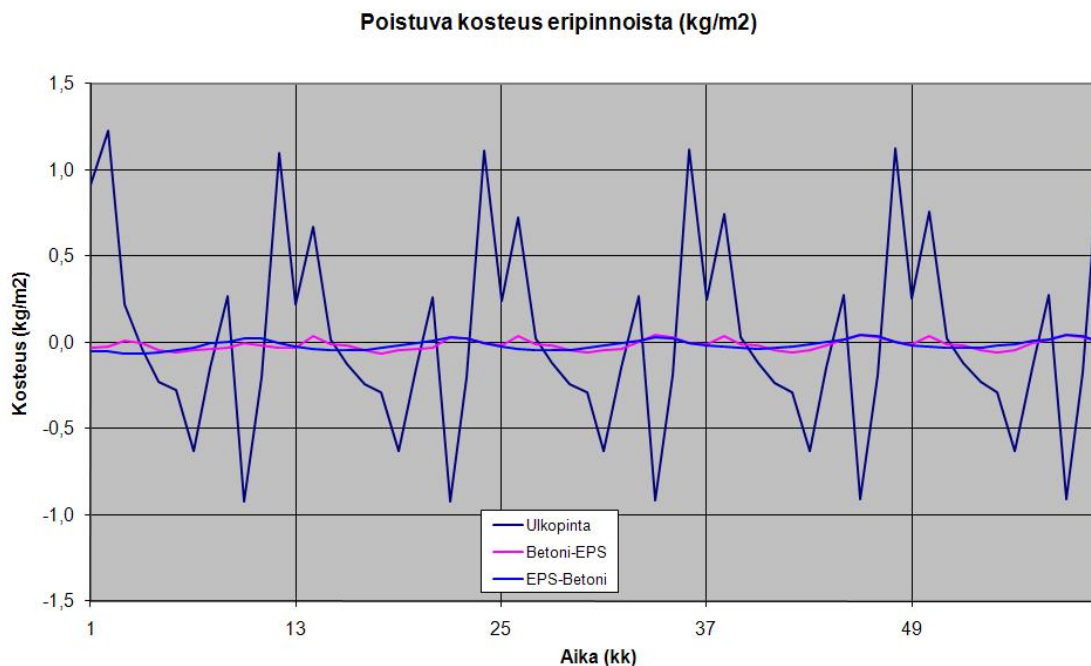


**Kuva 3.49** Kuvassa on esitetty EPS:n keskimääräisiä kosteuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) eräille laskentatapauksille ilman tuuletusta. Kohdassa 3.1.2.2 tehdyn kosteuskapasiteetti käytän korjauksen johdosta maksimiarvot selvästi todellisuutta suurempia etenkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Espoon eteläisellä julkisivulla pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa tapahtuvia kosteusvirtoja on esitetty kuvassa (Kuva 3.50). Ulkokuoren ulkopintaan tulivat suurimmat kosteusvirrat syys- ja marraskuussa. Vastaavasti eniten ulkopinnasta poistui kosteutta huhti- ja heinäkuussa. Pisteitä P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa kosteuden liikkeet olivat pienimmät. Eniten kosteutta kerääntyi P2 vastaavassa rajapinnassa marraskuussa, heinäkuussa sekä elokuussa ja pistettä P5 vastaavassa rajapinnassa heinäkuussa ja elokuussa. Ajoittaisesta kosteuden kerääntymisestä huolimatta, koko laskentajakson ajan kaikista rajapinnoista kuitenkin poistui enemmän kosteutta kuin kerääntyi (ks. Taulukko 3.31). Laskentajakson lopussa eri rajapinnoista poistuva kosteus tasaantui noin  $50 \text{ g/m}^2/\text{vuosi}$  tasolle.

**Taulukko 3.31** Taulukossa on esitetty Espoon eteläjulkisivulla eri rajapinnoista vuositason poistuva ja kerääntyvä kosteus ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa ja positiivinen sisään päin suuntautuvaa virtausta.

	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - EPS ( $\text{kg/m}^2$ )			EPS - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-21,379	22,688	1,310	-0,071	-0,235	-0,306	-0,245	-0,070	-0,315
2 vuosi	-22,142	21,872	-0,270	-0,054	-0,145	-0,199	-0,173	-0,004	-0,177
3 vuosi	-22,077	21,926	-0,151	-0,047	-0,070	-0,117	-0,173	-0,004	-0,177
4 vuosi	-22,044	21,953	-0,091	-0,043	-0,032	-0,076	-0,076	0,002	-0,074
5 vuosi	-22,024	21,967	-0,057	-0,041	-0,007	-0,049	-0,049	0,001	-0,048
Poistuva kosteus/rajapinta:			0,741			-0,746			-0,791



**Kuva 3.50** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuehto oli 1.10.2009.

Tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä ja sen tuloksia Espoon ilmastossa on esitetty taulukossa (Taulukko 3.32). Eteläisellä julkisivulla tuuletuksen poistama kosteus määrä oli noin kolminkertainen nollajulkisivuun verrattuna. Tehokkaimmin tuuletus poisti kosteutta heinäkuussa ja toukokuussa, kun talvikuukausina poistuvan kosteuden määrä oli lähinnä nimellinen. Vuositasolla nollajulkisivulla tuuletus poisti n. 80 g/m<sup>2</sup>/vuosi ja eteläjulkisivulla 260 g/m<sup>2</sup>/vuosi.

**Taulukko 3.32** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä arvioitua tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta Espoossa sekä nolla- että eteläjulkisivulla. Laskelmissa virtausnopeutena oli 0,01 m/s urituksen ollessa 25 x 27 mm k150.

Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	18.6	16.3	30.7	24.5	13.1	29.1	132.3
2.vuosi	18.7	16.3	30.6	24.1	12.8	31.2	133.6
3.vuosi	18.7	16.2	30.5	23.8	12.7	30.9	132.8
4.vuosi	18.6	16.2	30.4	23.7	12.6	30.8	132.4
5.vuosi	18.6	16.2	30.3	23.7	12.6	30.8	132.1
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	7.5	5.4	10.5	6.3	3.6	8.2	41.5
2.vuosi	7.5	5.3	10.2	6.1	3.5	9.1	41.7
3.vuosi	7.3	5.1	10.0	5.8	3.3	8.5	40.0
4.vuosi	7.2	4.9	9.7	5.6	3.2	7.8	38.5
5.vuosi	7.1	4.8	9.6	5.5	3.1	7.4	37.4

Vertailun vuoksi taulukossa (Taulukko 3.33) on esitetty diffuusiolla koko rakenteen läpi meneviä kosteusvirtoja erilaisissa stationääritilanteissa. Verrattuna tuuletuksen

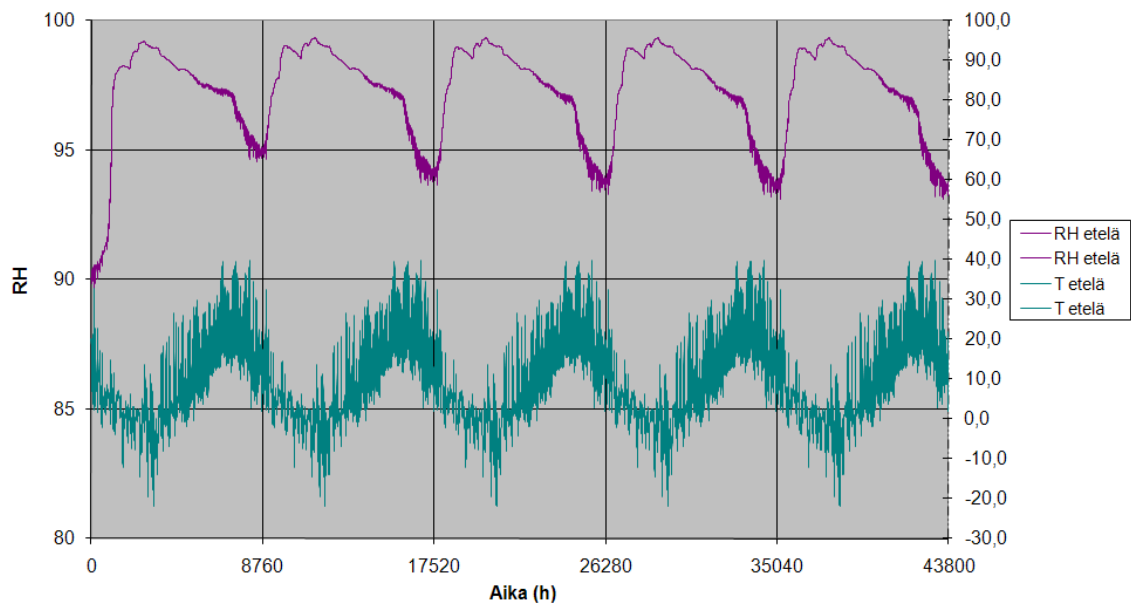
kautta poistuviin kosteusvirtoihin, diffuusiolla poistuu kesäaika lukuun ottamatta vuoden aikana enemmän kosteutta kuin tuuletuksella.

**Taulukko 3.33** Taulukossa on esitetty vertailun vuoksi erilaisissa stationääritilanteissa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa ( $\text{g/m}^2\text{kk}$ ). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  ja EPS:lle  $4,72 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

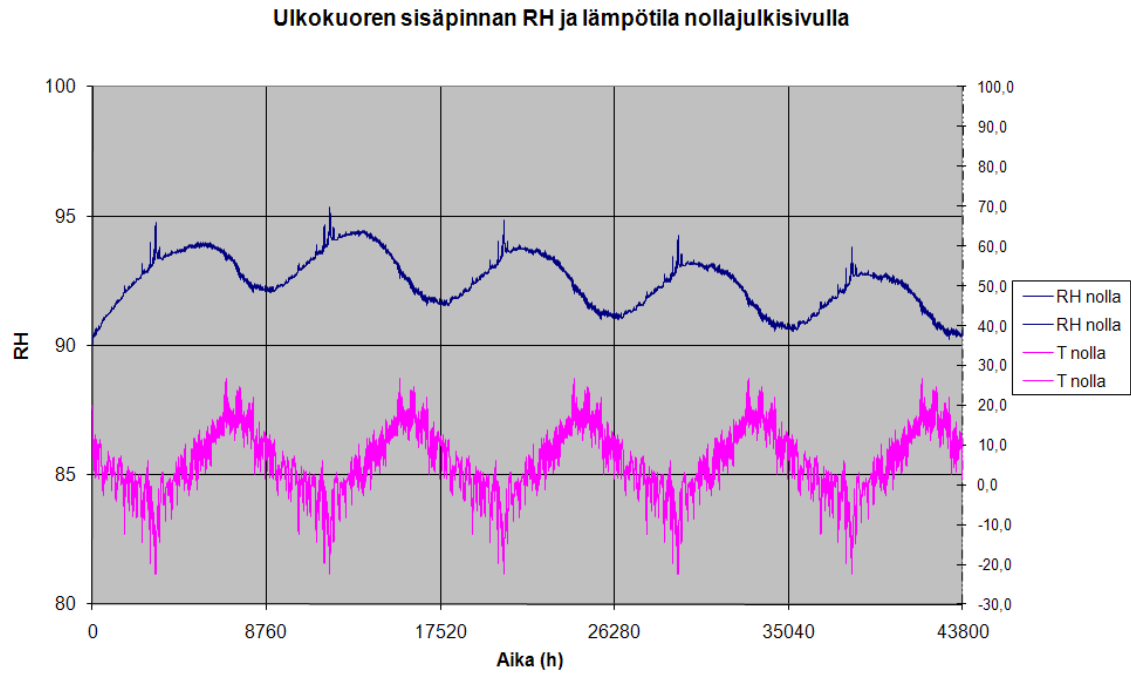
	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Olosuhteet	7.74	0.69	12.37	0.79	17.43	0.74	16.54	0.81	10.21	0.82	0.15	0.87
<b>g (<math>\text{g/m}^2\text{kk}</math>)</b>	8.48		5.69		6.69		4.83		5.16		58.44	

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua tarkasteltiin pisteessä P2 sekä eteläisellä että nollajulkisivulla. Eteläjulkisivulla (Kuva 3.51) suhteellisen kosteuden maksimi oli noin 98 %, joka saavutettiin joka talvi laskentajakson aikana. Elo- ja syyskuussa suhteellinen kosteus oli pienimmillään joka vuosi ja pieneni laskentajakson loppua kohden. Nollajulkisivulla (Kuva 3.52) suhteellisen kosteuden maksimi oli noin 95 % ja se pieneni laskentajakson loppua kohden. Nollajulkisivun suhteellisen kosteuden minimiarvo laskentajakson aikana oli hieman yli 90 %.

**Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla**



**Kuva 3.51** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Espoon eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

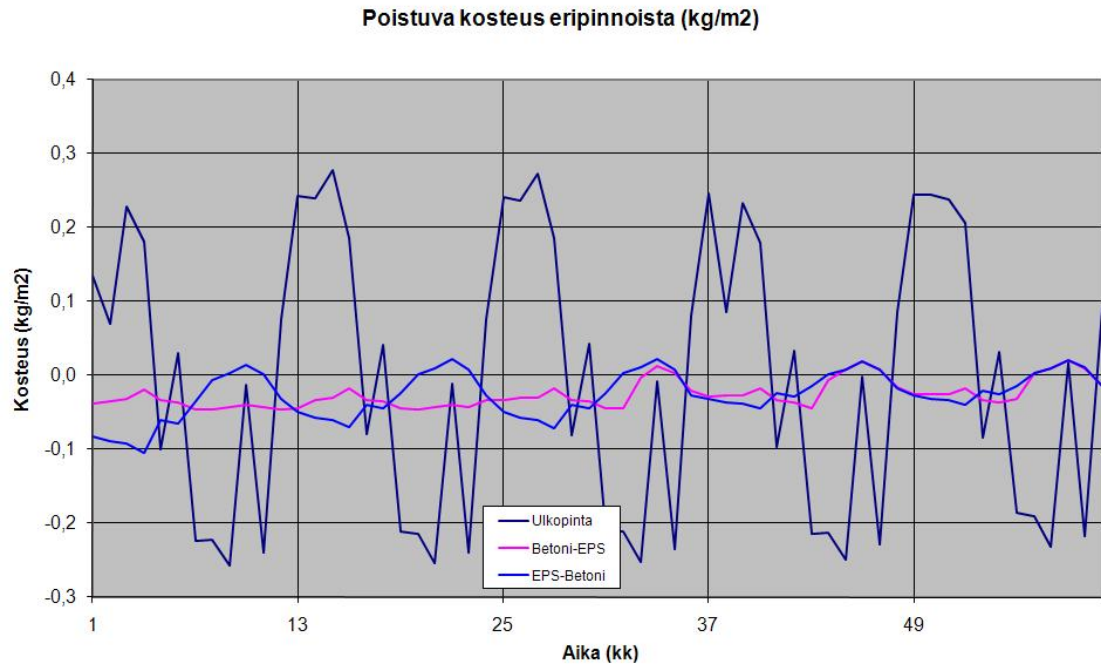


**Kuva 3.52** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon nollajulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

### 3.2.7.1 US7 Karasjoen ilmastossa

Karasjoen koillisjulkisivulla pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa olleet kosteusvirrat on esitetty kuvassa (Kuva 3.53). Suurimmillaan ulkokuoren ulkopintaan kertyi kosteutta n.  $250 \text{ g/m}^2/\text{kk}$  loka-, marras- ja joulukuussa. Pisteessä P5 kosteutta kertyi eniten kesän kuukausina suurimman kertymän ajoittuessa heinäkuulle. Pistettä P2 vastaavassa rajapinnassa kosteuskäyttäytyminen oli laskentajakson loppupuolella samanlaista, kun taas laskennan alussa P2 vastaavaan rajapintaan ei juuri kosteutta kertynyt minään vuodenaikana.





**Kuva 3.53** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa ilman tuuletusta. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Vuositasolla rajapinnoista poistuvia kosteusmääriä on esitetty taulukossa (Taulukko 3.34) yhteenlaskettuna sekä eriteltynä diffuusiolla ja kapillaarivirtauksella tapahtuvaan osaan. Taulukosta nähdään, että ajoittaisesta kosteuden kerääntymisestä huolimatta vuositasolla kaikista rajapinnoista virtasi enemmän kosteutta ulospäin kuin sisäänpäin. Laskennan lopussa kaikissa rajapinnoissa kosteusvirtaus oli n. 160 g/m<sup>2</sup>/vuosi.

**Taulukko 3.34** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivulla eri rajapinnoista vuositasolla poistuva ja kerääntyvä kosteus (kg/m<sup>2</sup>/vuosi), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa ja positiivinen sisäänpäin suuntautuvaa virtausta.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - EPS (kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht
<b>1 vuosi</b>	-0,784	0,446	-0,338	-0,143	-0,314	-0,456	-0,463	-0,086	-0,549
<b>2 vuosi</b>	-0,392	0,446	0,054	-0,139	-0,305	-0,443	-0,325	-0,004	-0,329
<b>3 vuosi</b>	-0,381	0,446	0,065	-0,106	-0,170	-0,277	-0,325	-0,004	-0,329
<b>4 vuosi</b>	-0,588	0,446	-0,142	-0,093	-0,110	-0,203	-0,199	0,000	-0,199
<b>5 vuosi</b>	-0,283	0,446	0,163	-0,086	-0,078	-0,164	-0,162	0,000	-0,162
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-0,197</b>			<b>-1,544</b>			<b>-1,567</b>

Tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä sekä Karasjoen koillis- että eteläjulkisivulla. Tuloksista nähdään (Taulukko 3.35), että tuuletuksen kosteuden poisto jäi pienemmäksi kuin Espoossa (vertaa Taulukko 3.32). Koillisjulkisivulta tuuletuksen kautta kuivuva kosteus jäi hieman pienemmäksi kuin Espoon nollajulkisivun. Eteläjulkisivulla tuuletuksen poistama kosteus jäi hieman alle puoleen Espoon eteläjulkisivuun verrattuna ollen kuitenkin hieman nollajulkisivua suurempi.

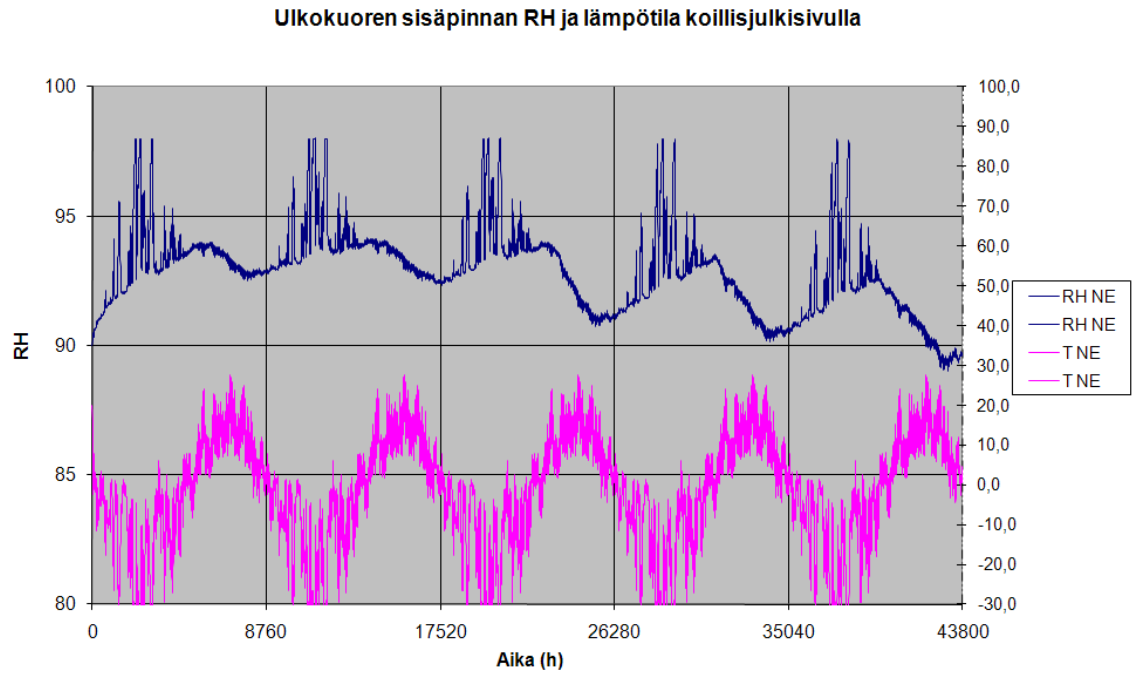


**Taulukko 3.35** Ohessa on esitetty tuuletusurituksen poistama kosteus Gertisin menetelmällä arvioituna Karasjoen eteläisellä ja koillisjulkisivulla. Laskennassa virtausnopeutena oli 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150. Laskennassa lämpötilat ja suhteelliset kosteudet on saatu WUFI:n tuloksista tunnin välein laskentajakson ajalta. Tuuletuksen mukana poistuva kosteus on laskettu näiden tulosten perusteella joka tunnille erikseen ja vuoden sekä kuukausitason poistuvat kosteudet on laskettu summaamalla näitä tunnin jaksoja tarvittava määrä.

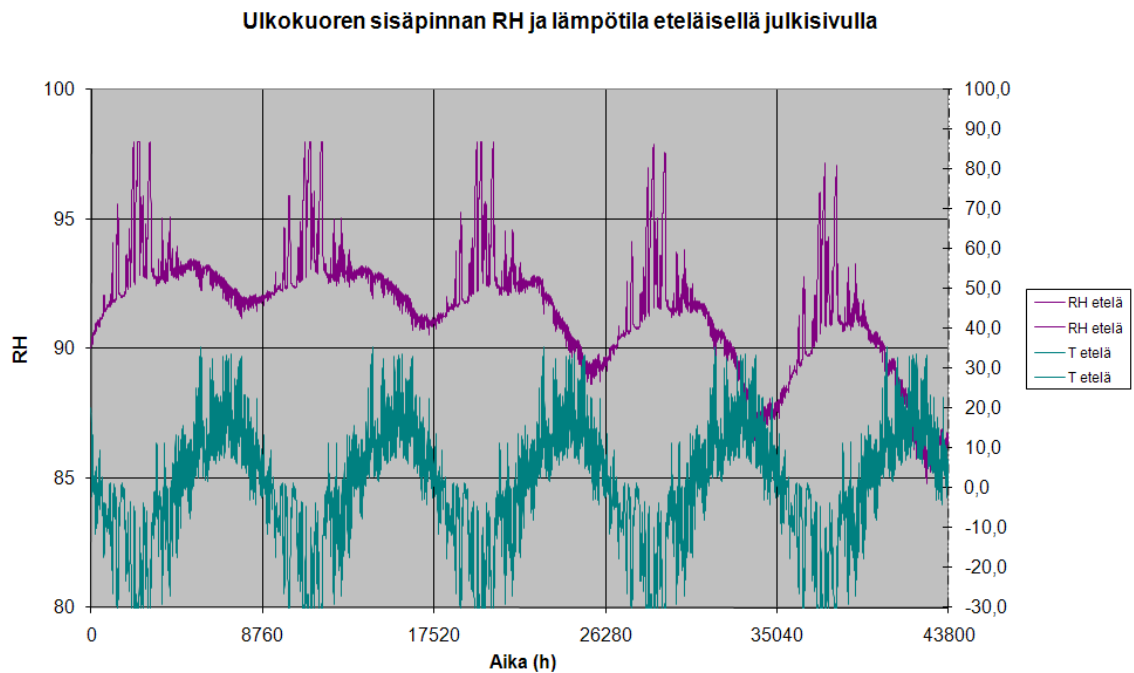
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus koillisella julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
<b>1.vuosi</b>	7.5	4.8	8.8	5.1	2.4	4.7	<b>33.5</b>
<b>2.vuosi</b>	7.6	4.8	8.8	5.1	2.4	5.3	<b>34.1</b>
<b>3.vuosi</b>	7.5	4.6	8.2	4.5	2.1	5.1	<b>32.0</b>
<b>4.vuosi</b>	7.2	4.3	7.9	4.2	2.0	4.6	<b>30.1</b>
<b>5.vuosi</b>	6.9	3.9	7.5	3.9	1.8	4.2	<b>28.2</b>
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
<b>1.vuosi</b>	11.1	6.6	11.2	9.4	4.2	9.8	<b>52.4</b>
<b>2.vuosi</b>	11.0	6.5	11.1	9.2	4.0	10.1	<b>51.9</b>
<b>3.vuosi</b>	10.9	6.0	10.3	8.4	3.7	9.6	<b>48.9</b>
<b>4.vuosi</b>	10.3	5.6	9.5	7.5	3.3	9.0	<b>45.2</b>
<b>5.vuosi</b>	10.0	5.0	8.8	6.9	3.0	8.3	<b>42.0</b>

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkkailtiin pisteessä P2 sekä koillis- että eteläjulkisivulla. Koillisjulkisivulla (Kuva 3.54) suhteellisen kosteuden vuosittainen minimi arvo pysyi kahden ensimmäisen laskentavuoden aikana suunnilleen samana, jonka jälkeen se alkoi pienetä. Suurin suhteellisen kosteuden arvo oli hieman yli 98 % ja se saavutettiin vuosittain laskentajakson loppuun saakka. Aika, jona suhteellisen kosteuden maksimi esiintyi, lyheni laskentajakson loppua kohden.

Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.55) suhteellisen kosteuden minimiarvo käyttäytyi samalla tavalla kuin koillisjulkisivulla, kahden ensimmäisen vuoden jälkeen minimi alkoi pienetä. Muuten eteläjulkisivulla suhteellinen kosteus oli lähes koko ajan hieman pienempi kuin koillisjulkisivulla. Laskentajakson lopussa eteläjulkisivun maksimi suhteellinen kosteus laski alle 98 % ja pienimmillään suhteellinen kosteus lähenteli 85 %. Suhteellisesta kosteudesta on syytä huomata materiaaliarvojen muokkauksesta laskennallisten syiden vuoksi aiheutuva ilmiö, jonka vuoksi suhteellinen kosteus ei juuri nouse yli 98 % (vrt. kohta 3.2.5).



**Kuva 3.54** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Karasjoen koillisjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

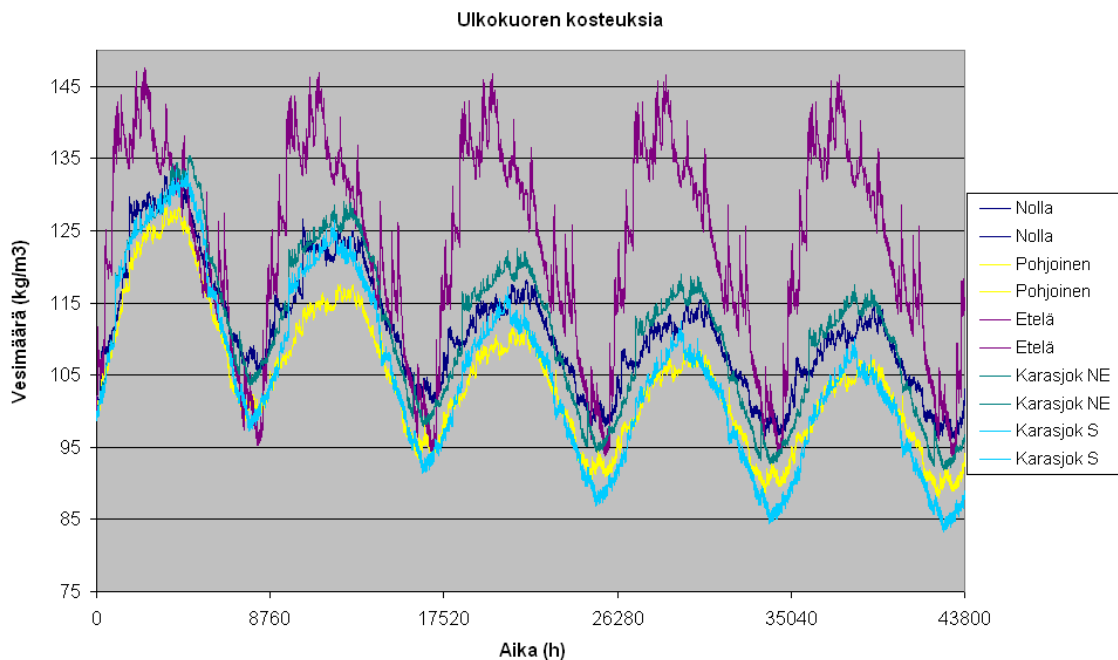


**Kuva 3.55** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Karasjoen eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

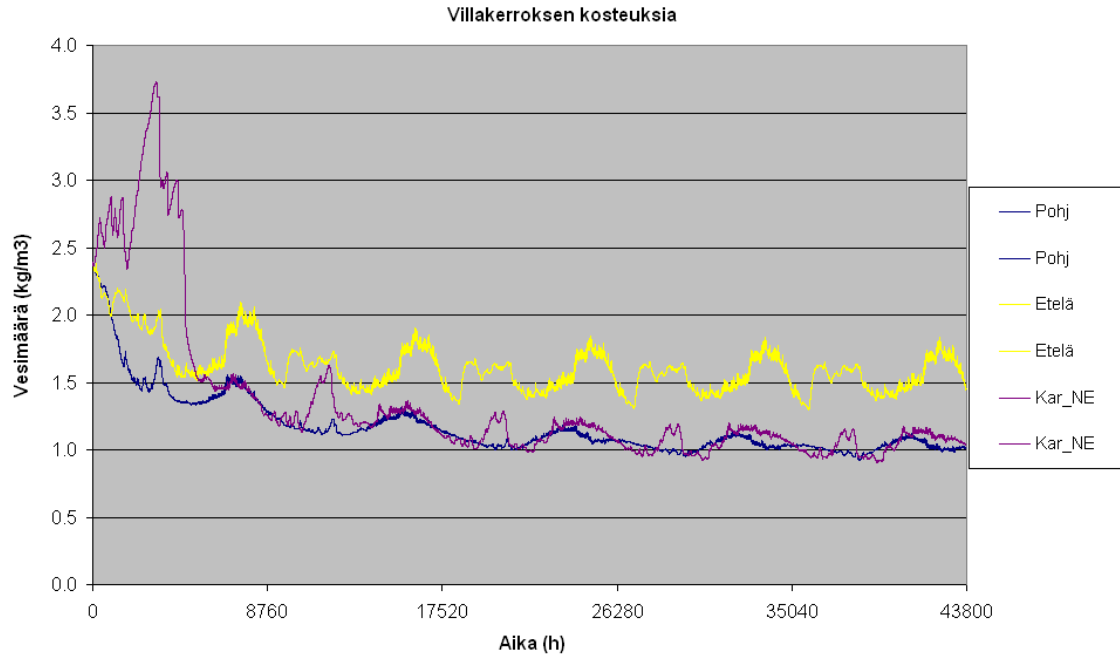
### 3.2.8. Rakennetyyppi US8

Rakennetyyppi US8 on villaeristeinen BSW-rakenne, joka täyttää tällä hetkellä vuodelle 2012 kaavaillun eristysmääräyksen. Rakennetta tarkasteltiin laskelmissa tuulettumattomana, mutta tuulettumattoman rakenteen tulosten perusteella tehtiin arvio tuuletuksen kuivattavasta vaikutuksesta.

Ulkokuoren keskimääräisiä vesimääriä ( $\text{kg/m}^3$ ) eri laskentatapauksille on esitetty kuvassa (Kuva 3.56). Eteläisellä julkisivulla maksimikosteus pysyi vuodesta toiseen samana, eli hieman yli  $145 \text{ kg/m}^3$ , mutta vuosittainen minimikosteus pieneni laskentajakson loppua kohden. Muilla julkisivuilla erot toisiinsa nähden olivat pienet ja laskennan loppua kohden kaikissa pieneni niin vuosittainen maksimi kuin minimi vesimäärä. Villakerroksen kosteuspitoisuudet (Kuva 3.57) laskivat kaikilla laskenta tapauksilla, mutta Espoon eteläjulkisivulla lasku jäi pienimmäksi.



**Kuva 3.56** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US8 erilaisilla sääolosuhteilla, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

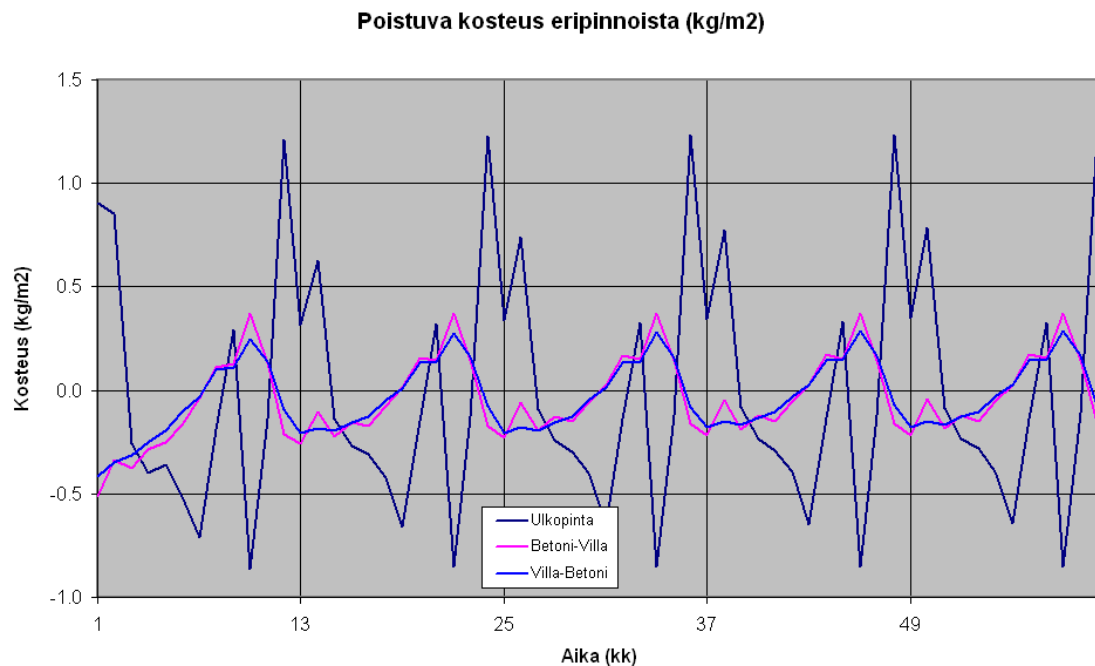


**Kuva 3.57** Kuvassa on esitetty villan keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) julkisivun ollessa pohjoiseen ja etelään Espoossa sekä koilliseen Karasjoella, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Eteläisellä julkisivulla pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa laskennan aikana esiintyneitä kosteusvirtoja on esitetty kuvassa (Kuva 3.58). Ulkopinnassa eniten kosteutta kerääntyi syyskuussa ja eniten kosteutta poistui heinäkuussa. Pisteitä P2 ja P5 vastaavissa sisäpinnoissa kosteutta virtasi sisäänpäin kesäisin ja poistui talvisin. Vuositasolla kaikista rajapinnoista poistui enemmän kosteutta kuin niihin kerääntyi (Taulukko 3.36). Laskennan lopussa poistuvan kosteuden määrä oli kaikissa rajapinnoissa noin  $50 \text{ g/m}^2/\text{vuosi}$ .

**Taulukko 3.36** Taulukossa on esitetty Espoon eteläjulkisivulla eri rajapinnoista vuositasolla poistuva ja kerääntyvä kosteus ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa ulospäin suuntautuvaa ja positiivinen sisään päin suuntautuvaa virtausta.

	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - PUR ( $\text{kg/m}^2$ )			PUR - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
1 vuosi	-22.335	22.157	-0.178	2.363	-3.790	-1.427	-1.114	-0.035	-1.149
2 vuosi	-22.357	21.926	-0.431	2.464	-2.795	-0.331	-0.358	0.087	-0.271
3 vuosi	-22.200	22.055	-0.146	2.443	-2.561	-0.117	-0.358	0.088	-0.270
4 vuosi	-22.158	22.090	-0.068	2.439	-2.501	-0.062	-0.144	0.087	-0.057
5 vuosi	-22.151	22.097	-0.054	2.438	-2.491	-0.053	-0.133	0.087	-0.046
Poistuva kosteus/rajapinta:			-0.876			-1.989			-1.792



**Kuva 3.58** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa, kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuehti oli 1.10.2009.

Tuuletuksen poistamaa kosteutta arvioitiin Gertisin menetelmällä ja sen tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 3.37) Espoon etelä- ja nollajulkisivulle. Eteläjulkisivulla tuuletuksen poistama kosteus oli parhaimmillaan noin kolminkertainen nollajulkisivuun verrattuna. Eniten kosteutta urituksen kautta poistui heinäkuussa ja toukokuussa. Eteläjulkisivulla laskentajakson loppua kohden poistuvat kosteusvirrat pienenevät vähemmän kuin nollajulkisivulla.

**Taulukko 3.37** Ohessa on esitetty tuuletusurituksen poistama kosteus Gertisin menetelmällä arvioituna eteläisellä ja nollajulkisivulla. Laskennassa virtausnopeutena oli 0,01 m/s ja urituksena 25 x 27 mm k150. Laskennassa lämpötilat ja suhteelliset kosteudet on saatu WUFI:n tuloksista tunnin välein laskentajakson ajalta. Tuuletuksen mukana poistuva kosteus on laskettu näiden tulosten perusteella joka tunnille erikseen ja vuoden sekä kuukausitason poistuvat kosteudet on laskettu summaamalla näitä tunnin jaksoja tarvittava määrä.

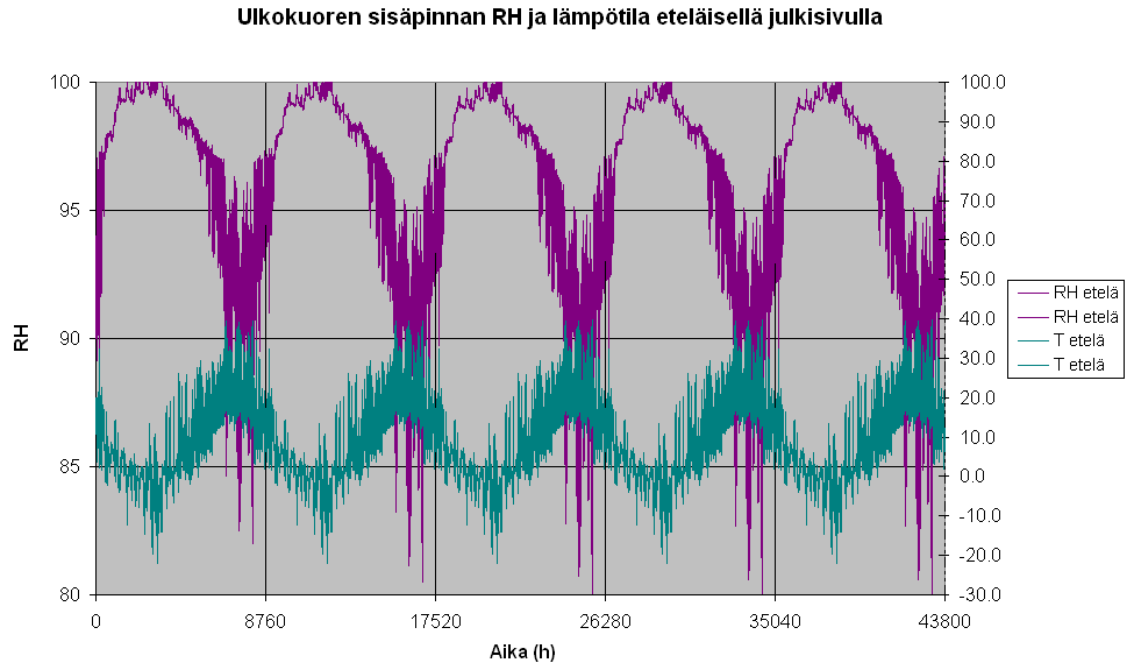
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	73.4	61.6	107.0	82.6	48.7	122.9	496.2
2.vuosi	72.6	60.0	104.3	79.8	47.0	122.2	485.9
3.vuosi	72.3	59.5	103.4	78.9	46.5	120.9	481.5
4.vuosi	72.2	59.4	103.2	78.7	46.4	120.5	480.3
5.vuosi	72.2	59.4	103.2	78.7	46.4	120.4	480.2
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus nollajulkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	33.4	25.4	44.6	28.1	18.3	56.9	206.6
2.vuosi	32.4	22.5	40.5	24.0	15.4	51.8	186.7
3.vuosi	30.4	20.1	37.4	21.1	13.6	45.8	168.4
4.vuosi	29.5	19.1	35.9	19.4	12.8	40.6	157.3
5.vuosi	29.1	18.7	35.2	18.6	12.5	38.5	152.6

Vertailun vuoksi taulukossa (Taulukko 3.38) on esitetty diffuusiolla koko rakenteen läpi tapahtuvia kosteusvirtoja erilaisissa stationääritilanteissa. Verrattuna tuuletuksen poistamiin kosteusmääriin, olivat diffuusiolla tapahtuvat kosteusvirrat selvästi pienempiä. Etenkin kesäkuukausina tuuletuksella poistuva kosteus määrä oli jopa nelinkertainen diffuusiolla tapahtuvaan kosteusvirtaukseen. Talvikuukausina tuuletuksen poistama kosteus jäi kuitenkin diffuusiolla tapahtuvaa kosteusvirtausta pienemmäksi.

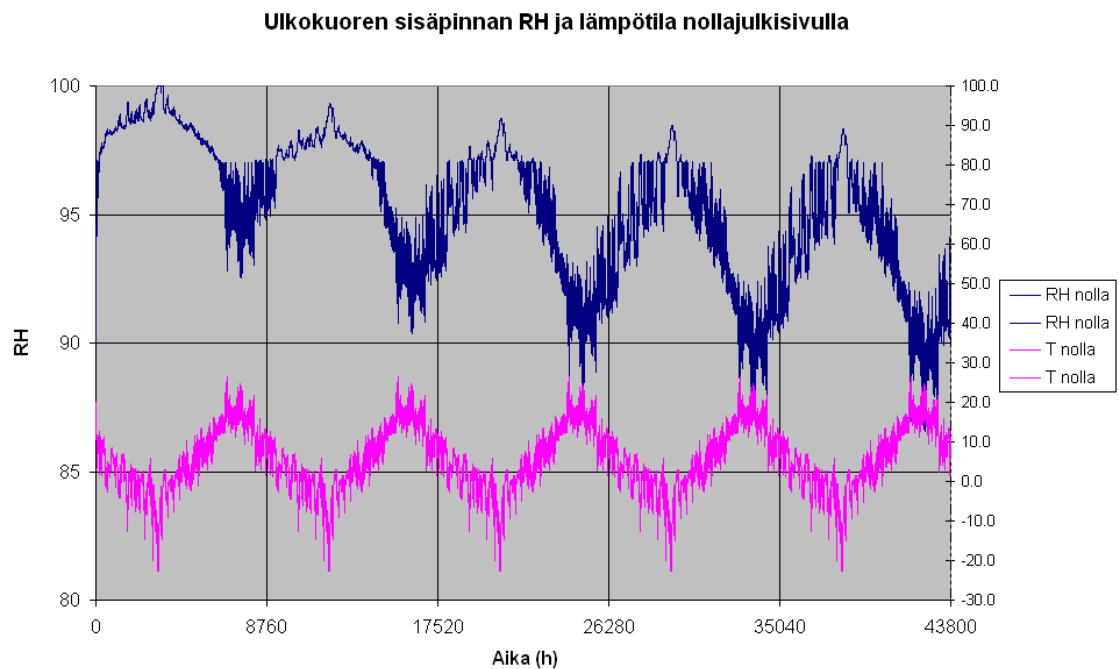
**Taulukko 3.38** Taulukossa on esitetty vertailun vuoksi erilaisissa stationääritilanteissa rakenteen läpi menevää diffuusiokosteusvirtaa (g/m<sup>2</sup>kk). Ulko-olosuhteina on käytetty Espoon säätiedoston mukaisia kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on myös esitetty taulukossa ja sisäilmastona SFS-EN 15026 mukaista sisäilmaa. Tarkasteltu julkisivu oli nollajulkisivu. Vesihöyryn läpäisevyytenä käytettiin betonille  $1,82 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ja villalle  $1,82 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

	Toukokuu		Kesäkuu		Heinäkuu		Elokuu		Syyskuu		1.10-30.4	
	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH	T	RH
Olosuhteet	7.74	0.69	12.37	0.79	17.43	0.74	16.54	0.81	10.21	0.82	0.15	0.87
g (g/m <sup>2</sup> kk)	13.38		8.98		10.56		7.62		8.15		92.23	

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkasteltiin pisteessä P2 sekä etelä- että nollajulkisivulla. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.59) suhteellinen kosteus oli koko laskenta jakson ajan talvisin 100 % tuntumassa. Laskentajakson loppua kohden suhteellisen kosteuden minimi arvo pieneni. Nollajulkisivulla (Kuva 3.60) suhteellisen kosteuden maksimi ja minimi pienenivät laskennan loppua kohden ja maksimi vakiintui lopussa noin 97 % tienoille ja minimi hieman alle 90 %. Eteläjulkisivuun verrattuna minimi suhteellisessa kosteudessa oli vähemmän hajontaa nollajulkisivulla.



**Kuva 3.59** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon eteläjulkisivulla, kun tuulettusta ei ole huomioitu.

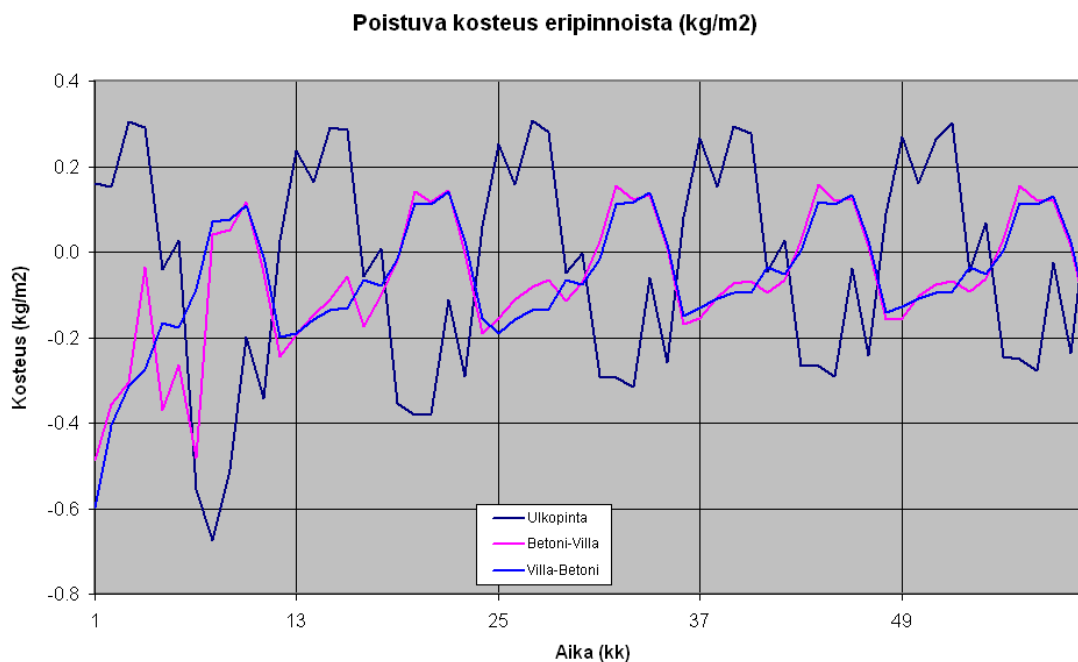


**Kuva 3.60** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon nollajulkisivulla, kun tuulettusta ei ole huomioitu.

### 3.2.8.1 US8 Karasjoen ilmastossa

Pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavien rajapintojen kosteusvirrat Karasjoen koillisjulkisivulla on esitetty kuvassa (Kuva 3.61). Ulkokuoren ulkopinnassa eniten kosteutta virtasi sisäänpäin joulu- ja tammikuussa. Pisteitä P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa kosteutta virtasi sisäänpäin kesäkuukausina huhtikuusta elokuuhun, jonka jälkeen kosteusvirran

suunta kääntyi ulospäin. Vuositasolla rakenteen sisäpinnoista kuitenkin kosteutta virtasi enemmän ulos kuin sisään päin (Taulukko 3.39).



**Kuva 3.61** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

**Taulukko 3.39** Taulukossa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivulla eri rajapinnoista vuositasolla poistuva ja kerääntyvä kosteusvirtoja (kg/m<sup>2</sup>/vuosi), kun tuuletusta ei ole huomioitu. Negatiivinen arvo tarkoittaa virtausta ulospäin ja positiivinen sisään päin.

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - EPS (kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht	<i>g<sub>diff</sub></i>	<i>g<sub>cap</sub></i>	yht
<b>1 vuosi</b>	-1.801	0.446	-1.355	0.539	-2.921	-2.382	-1.933	-0.039	-1.972
<b>2 vuosi</b>	-0.975	0.446	-0.528	0.664	-1.258	-0.595	-0.540	0.004	-0.537
<b>3 vuosi</b>	-0.637	0.446	-0.191	0.678	-0.996	-0.317	-0.540	0.004	-0.536
<b>4 vuosi</b>	-0.490	0.446	-0.044	0.644	-0.922	-0.279	-0.273	0.002	-0.270
<b>5 vuosi</b>	-0.376	0.446	0.071	0.616	-0.887	-0.271	-0.269	0.002	-0.267
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-2.047</b>			<b>-3.845</b>			<b>-3.581</b>

Tuuletuksen vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmällä sekä etelä- että koillisjulkisivulla (Taulukko 3.40). Tehokkaimpia kosteuden poisto kuukausia olivat heinäkuu ja toukokuu. Espoon julkisivuihin verrattuna (Taulukko 3.37) poistuvan kosteuden määrät olivat pienemmät. Karasjoen eteläinen julkisivu oli hieman parempi kuin Espoon nollajulkisivu, kun taas Karasjoen koillisjulkisivu jäi nollajulkisivua heikommaksi. Karasjoella ilmansuunnalla ei ollut yhtä suurta vaikutusta poistuvan kosteuden määrään kuin Espoossa.



**Taulukko 3.40** Taulukossa on esitetty Gertisin menetelmällä arvioitua tuuletuksen kuivattavaa vaikutusta Karasjoella sekä etelä- että koillisjulkisivulla.

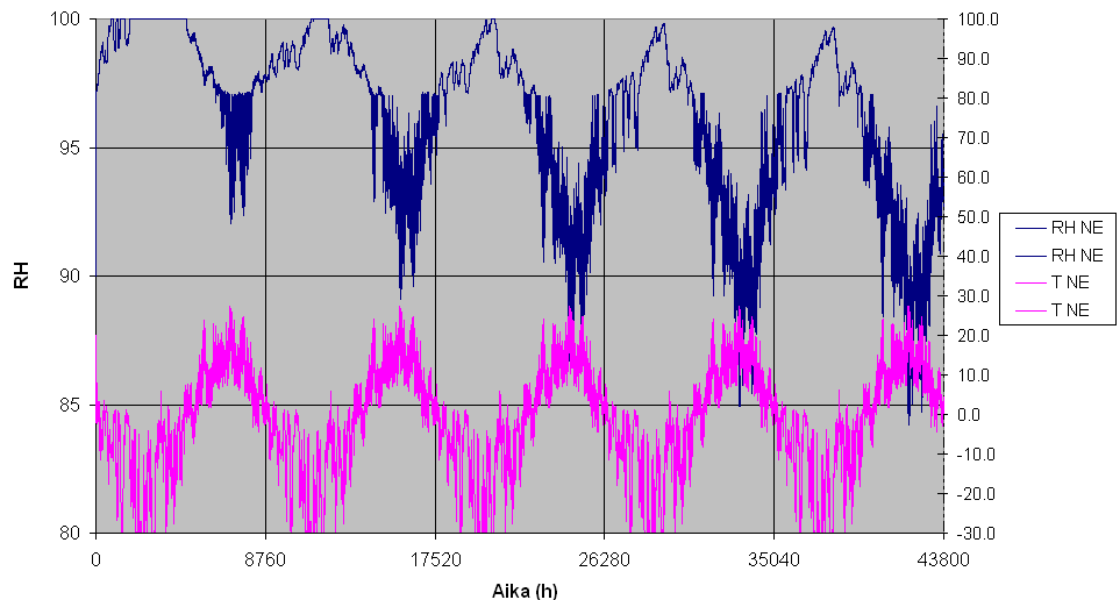
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus koillisella julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	34.5	23.7	37.9	23.6	13.0	32.5	165.1
2.vuosi	32.3	20.4	33.1	19.5	11.6	30.2	147.1
3.vuosi	29.8	17.7	29.4	16.6	10.3	27.9	131.6
4.vuosi	28.4	16.3	27.3	14.7	9.6	25.7	122.1
5.vuosi	27.8	15.6	26.1	13.6	9.3	24.6	117.1

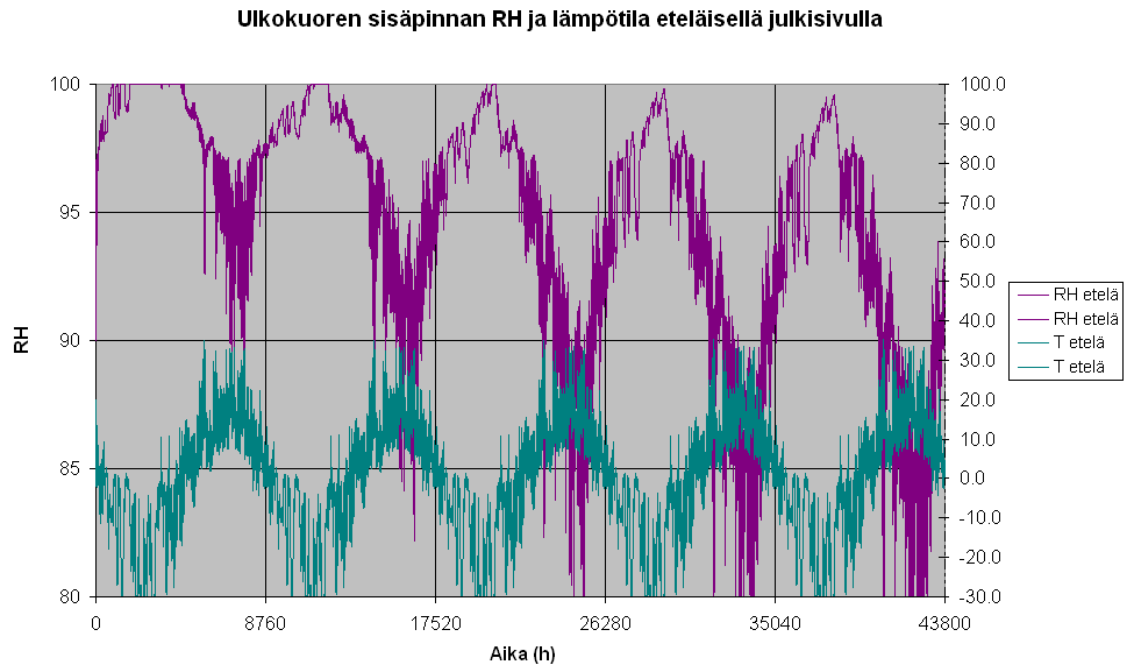
Tuuletuksen kautta kuivuva kosteus eteläisellä julkisivulla (g/m <sup>2</sup> )							
	touko	kesä	heinä	elo	syys	1.10-30.4	yht
1.vuosi	49.1	30.7	46.8	39.4	20.7	52.9	239.5
2.vuosi	45.3	26.5	40.6	33.5	18.2	50.7	214.8
3.vuosi	41.3	22.4	34.1	27.3	16.2	47.1	188.4
4.vuosi	38.9	19.5	29.6	23.5	15.0	43.4	169.7
5.vuosi	37.5	17.8	27.0	21.5	14.3	41.3	159.4

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkkailtiin pisteessä P2 sekä etelä- että koillisjulkisivulla. Koillisjulkisivulla (Kuva 3.62) suhteellisen kosteus talvisaikaan oli 100 % tietämissä, mutta pieneni kuitenkin loppua kohden samoin kuin aika, jona oltiin lähellä 100 %. Minimi suhteellinen kosteus pieneni nopeammin ja laskenta jakson lopussa käytiin jo hetkellisesti alle 86 %. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.63) suhteellisen kosteuden maksimi käyttäytyi samalla tavalla kuin koillisjulkisivulla, mutta minimi kosteudessa oli enemmän vaihtelua kesäkuukausina. Suhteellisen kosteuden minimi myös oli laskennan lopussa pienempi.

**Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila koillisjulkisivulla**



**Kuva 3.62** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen koillisjulkisivulla, kun tuulettamista ei ole huomioitu.



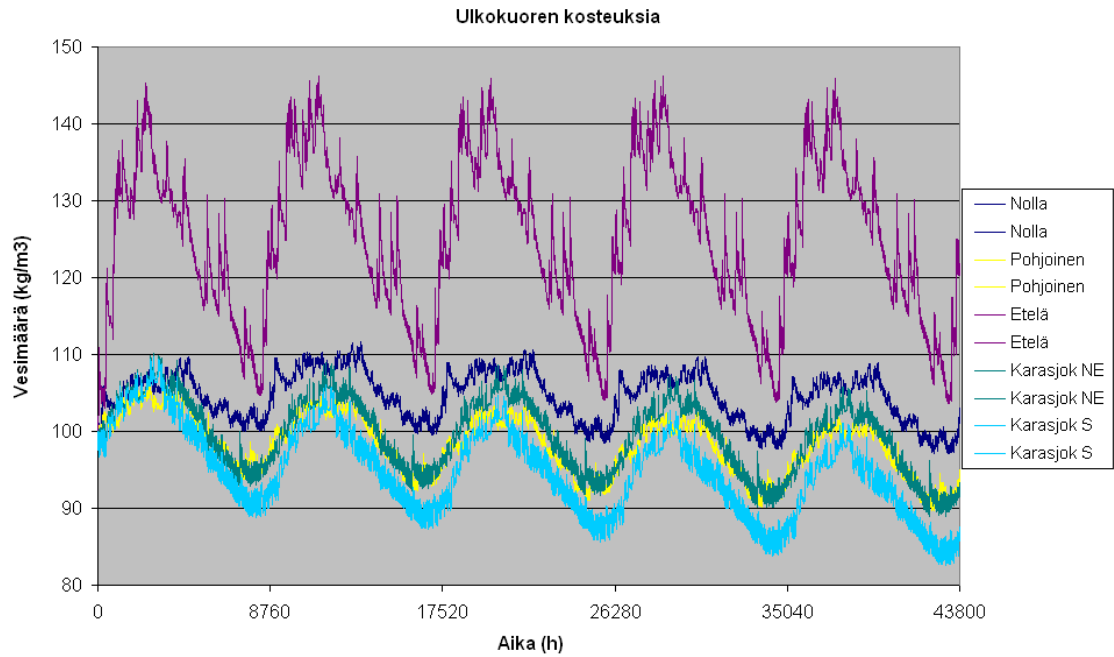
**Kuva 3.63** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen eteläjulkisivulla, kun tuuletusta ei ole huomioitu.

### 3.2.9. Rakennetyyppi US9

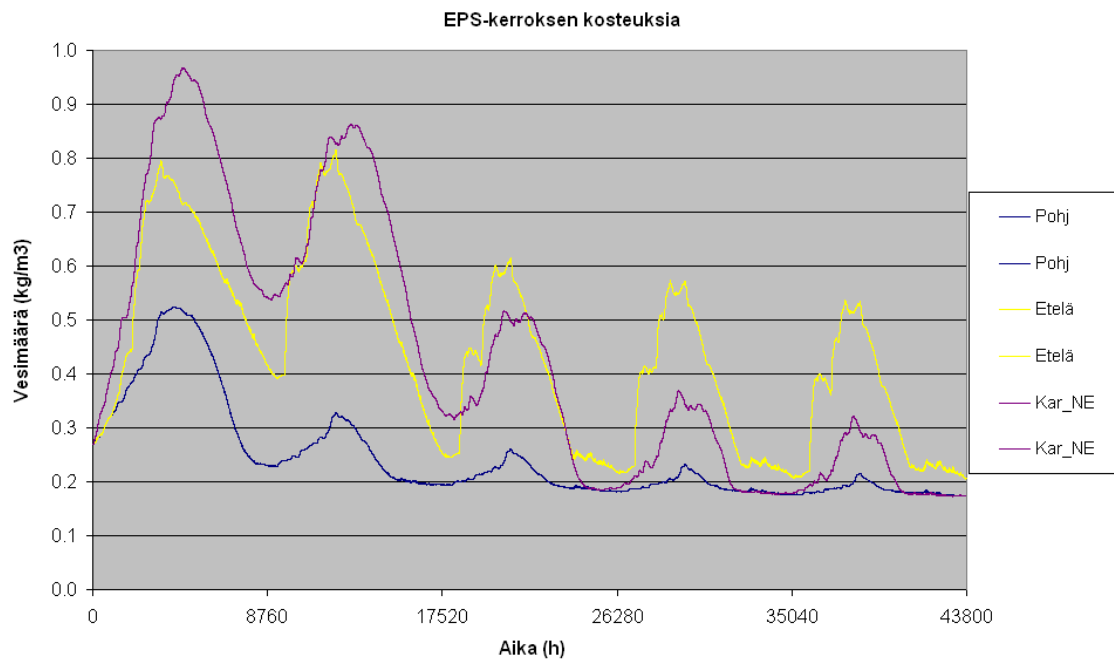
Rakennetyyppi US9 on EPS-eristeinen BSW-rakenne, joka täyttää vuodelle 2012 kaavaillut lämmöneristysmääräykset. Rakenteessa ei ole uritusta.

Ulkokuoren keskimääräisiä vesimääriä ( $\text{kg/m}^3$ ) on esitetty kuvassa (Kuva 3.64). Eteläinen julkisivu pysyi edelleen kosteimpana eikä kosteuden sykleissä ollut havaittavissa merkittävää muutosta laskennan loppua kohden. Muut julkisivut menivät hyvin lähellä toisiaan ja niissä vesimäärät laskivat hieman laskennan loppua kohti. Nollajulkisivulla vuoden sisäinen kosteuden vaihtelu oli kaikkein pienintä. Kuivimpana pysyi Karasjoen eteläjulkisivu, joskin eroa Espoon pohjoiseen oli vain n.  $2..3 \text{ kg/m}^3$ .

Eristekerroksen keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.65). Kaikilla julkisivuilla tapahtui eristekerroksen kuivumista Espoon eteläjulkisivulla kuivumisen jäädessä vähäisimmäksi. Laskentajakson lopussa Karasjoen koillis- ja Espoon pohjoisjulkisivun kesäaikainen minimikosteus oli lähes sama, mutta talvisaikaan Karasjoella eristekerrokseen kertyi enemmän kosteutta. Kaikilla laskentatapauksilla laskennan lopussa maksimivesimäärä asettui todellisen kosteuskapasiteetti käyrän alueelle.



**Kuva 3.64** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisen vesipitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) vaihtelu laskentajakson aikana rakennetyypille US9 erilaisilla sääolosuhteilla. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.



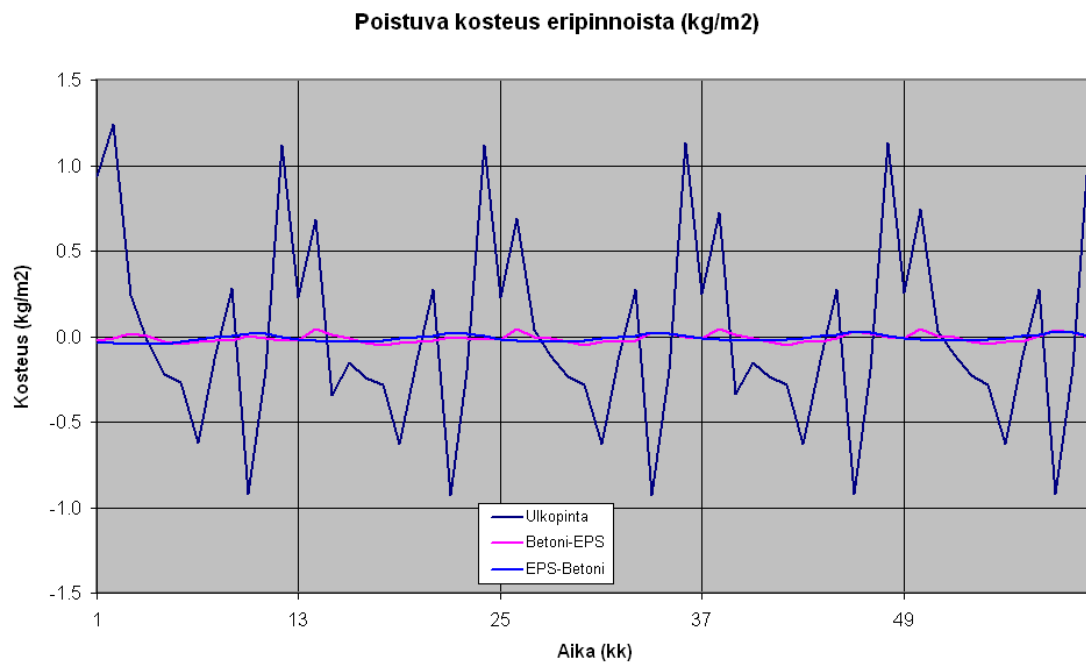
**Kuva 3.65** Kuvassa on esitetty EPS:n keskimääräisiä kosteuksia ( $\text{kg/m}^3$ ) eräille laskentatapauksille. Kohdassa 3.1.2.2 tehdyn kosteuskapasiteetti käytän korjauksen johdosta maksimiarvot selvästä todellisuutta suurempia etenkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa tapahtuvia kosteusvirtoja on esitetty kuvassa (Kuva 3.66). Ulkokuoren ulkopinnassa eniten kosteutta sisäänpäin virtasi syyskuussa ja marraskuussa. Sisemmissä rajapinnoissa kosteusvirrat olivat pienempiä kuin ulkopinnassa. Pistettä P2 vastaavassa rajapinnassa näkyi marraskuussa hienoinen

huippu, jossa kosteutta virtasi sisäänpäin. Vuositasolla kuitenkin kosteusvirrat olivat rakenteesta ulospäin (Taulukko 3.41). Laskennan lopussa eri rajapinnoista ulospäin virtaava kosteusvirta oli tasolla 40...50 g/m<sup>2</sup>/vuosi.

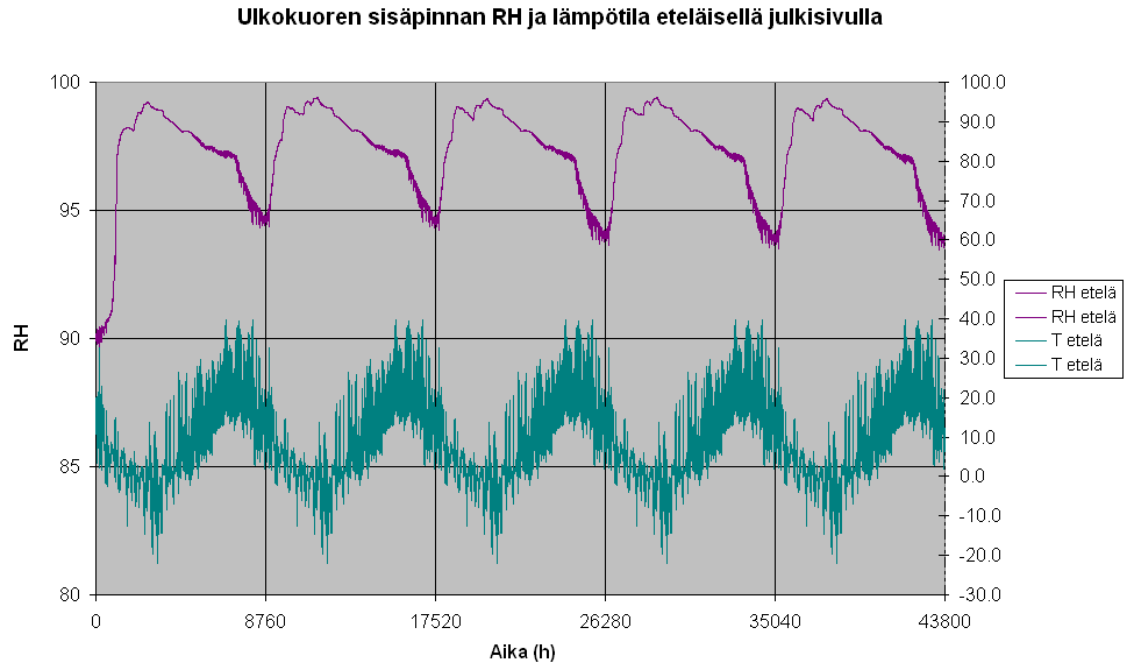
**Taulukko 3.41** Taulukossa on esitetty Espoon eteläjulkisivulla eri rajapinnoista vuositasolla poistuva ja kerääntyvä kosteus (kg/m<sup>2</sup>/vuosi), kun tuuletukselta ei ole huomioitu

	Ulkopinta (kg/m <sup>2</sup> )			Betoni - EPS (kg/m <sup>2</sup> )			EPS - Betoni (kg/m <sup>2</sup> )		
	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht	$g_{diff}$	$g_{cap}$	yht
1 vuosi	-20.990	22.413	1.424	-0.036	-0.151	-0.188	-0.175	-0.061	-0.237
2 vuosi	-22.070	21.458	-0.612	-0.034	-0.154	-0.188	-0.125	-0.004	-0.129
3 vuosi	-21.746	21.590	-0.156	-0.024	-0.080	-0.104	-0.125	-0.004	-0.129
4 vuosi	-22.019	21.502	-0.517	-0.021	-0.046	-0.067	-0.064	0.001	-0.063
5 vuosi	-21.691	21.641	-0.050	-0.019	-0.027	-0.046	-0.044	0.001	-0.044
Poistuva kosteus/rajapinta:			0.088			-0.593			-0.601



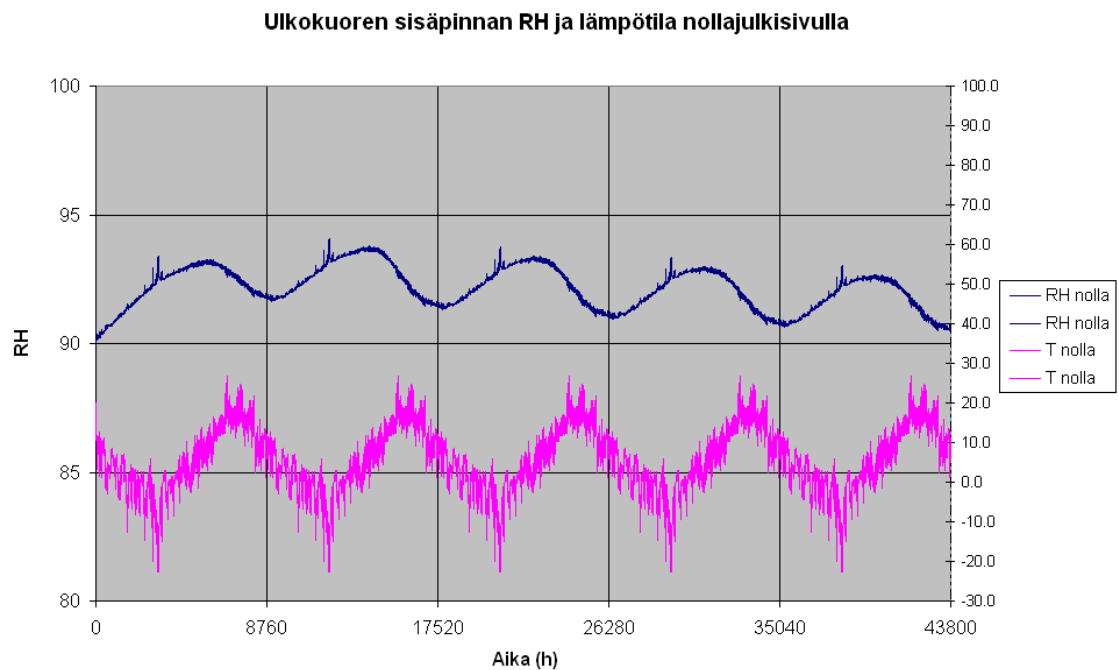
**Kuva 3.66** Kuvassa on esitetty Espoon eteläjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat (kg/m<sup>2</sup>/kk) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa tarkasteltiin pisteessä P2 eteläiselle ja nollajulkisivulle. Eteläjulkisivulla (Kuva 3.67) suhteellisen kosteuden maksimi käyttäytyi vuodesta toiseen samalla tavalla maksimin ollessa 98 % tietämissä. Suhteellisen kosteuden minimi sen sijaan pienenee hieman loppua kohden ollen lopussa alle 95 %.



**Kuva 3.67** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kehitystä laskentajakson aikana ilman tuuletusta Espoon eteläjulkisivulla. Suhteellisen kosteuden maksimissa syytä huomata kohdassa 3.1.2.2 tehty eristeen kosteuskapasiteetin korjaus, joka käytännössä estää kosteuden nousun yli 98 %. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009, jolloin rakenteessa vallitsi 90 % suhteellinen kosteus.

Nollajulkisivulla (Kuva 3.68) suhteellisen kosteuden maksimi alkoi laskea hieman kahden vuoden jälkeen samoin kuin minimi. Suhteellisen kosteuden vaihtelu vuoden aikana oli nollajulkisivulla pienempää kuin eteläjulkisivulla. Laskentajakson aikana suhteellinen kosteus oli koko ajan 90 ja 95 % välissä.



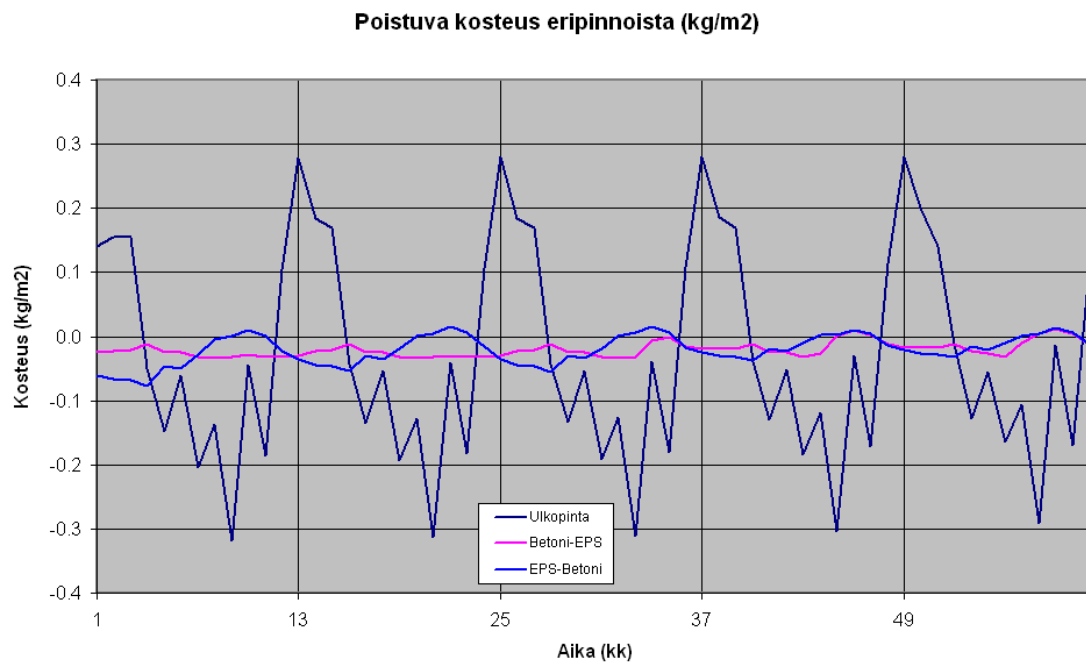
**Kuva 3.68** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Espoon nollajulkisivulla. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

### 3.2.9.1 US9 Karasjoella

Kosteusvirtoja pisteitä P1, P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa on esitetty kuvassa (Kuva 3.69). Ulkokuoren ulkopinnassa suurimmat kosteusvirrat sisäänpäin ovat lokakuussa ja vastaavasti ulospäin heinäkuussa. Laskentajakson loppuvaiheessa alkoi pisteissä P2 ja P5 kosteutta virrata kesä- ja heinäkuussa sisäänpäin. Kuitenkin vuositasolla kaikista rajapinnoista kosteutta virtasi enemmän ulospäin kuin sisäänpäin (Taulukko 3.42). Ensimmäisen vuoden jälkeen kosteusvirrat olivat vielä niin, että ulommasta rajapinnasta virtasi kosteutta aina enemmän ulospäin kuin sisemmästä. Tosin pisteitä P2 ja P5 vastaavissa rajapinnoissa ero oli marginaalinen.

**Taulukko 3.42** Taulukossa on esitetty Espoon eteläjulkisivulla eri rajapinnoista vuositasolla poistuva ja kerääntyvä kosteus ( $\text{kg/m}^2/\text{vuosi}$ ).

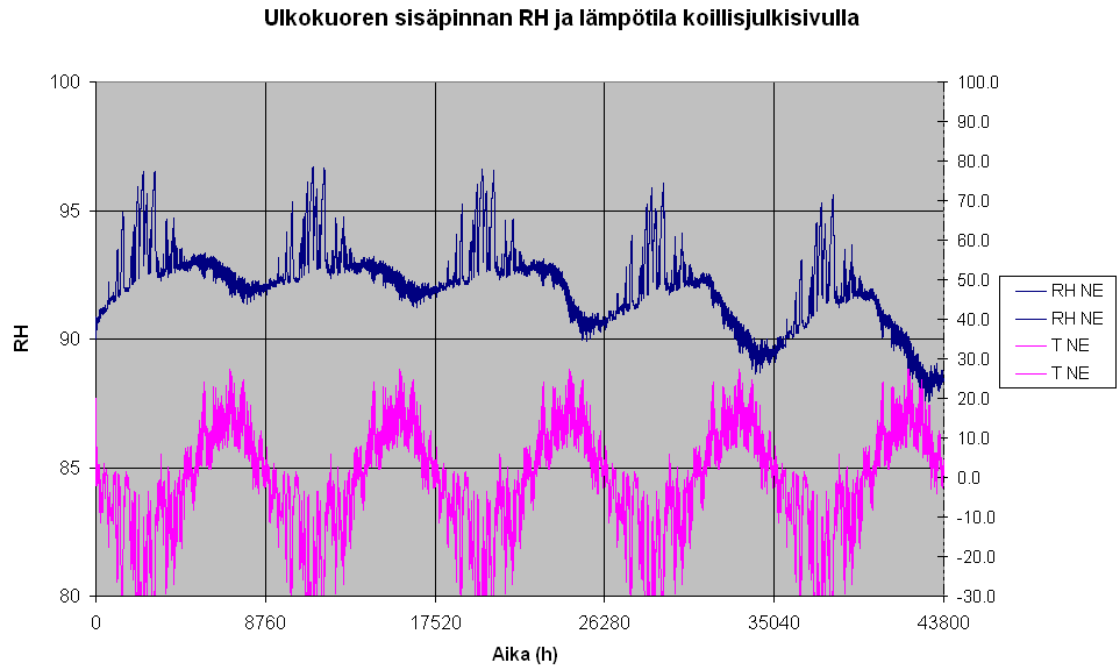
	Ulkopinta ( $\text{kg/m}^2$ )			Betoni - EPS ( $\text{kg/m}^2$ )			EPS - Betoni ( $\text{kg/m}^2$ )		
	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht	$g_{\text{diff}}$	$g_{\text{cap}}$	yht
<b>1 vuosi</b>	-1.043	0.446	-0.597	-0.100	-0.219	-0.319	-0.327	-0.084	-0.412
<b>2 vuosi</b>	-0.798	0.446	-0.352	-0.101	-0.227	-0.328	-0.245	-0.006	-0.252
<b>3 vuosi</b>	-0.784	0.446	-0.338	-0.085	-0.171	-0.257	-0.245	-0.006	-0.251
<b>4 vuosi</b>	-0.728	0.446	-0.282	-0.069	-0.105	-0.174	-0.168	0.000	-0.168
<b>5 vuosi</b>	-0.662	0.446	-0.216	-0.063	-0.079	-0.142	-0.139	0.000	-0.139
<b>Poistuva kosteus/rajapinta:</b>			<b>-1.785</b>			<b>-1.220</b>			<b>-1.222</b>



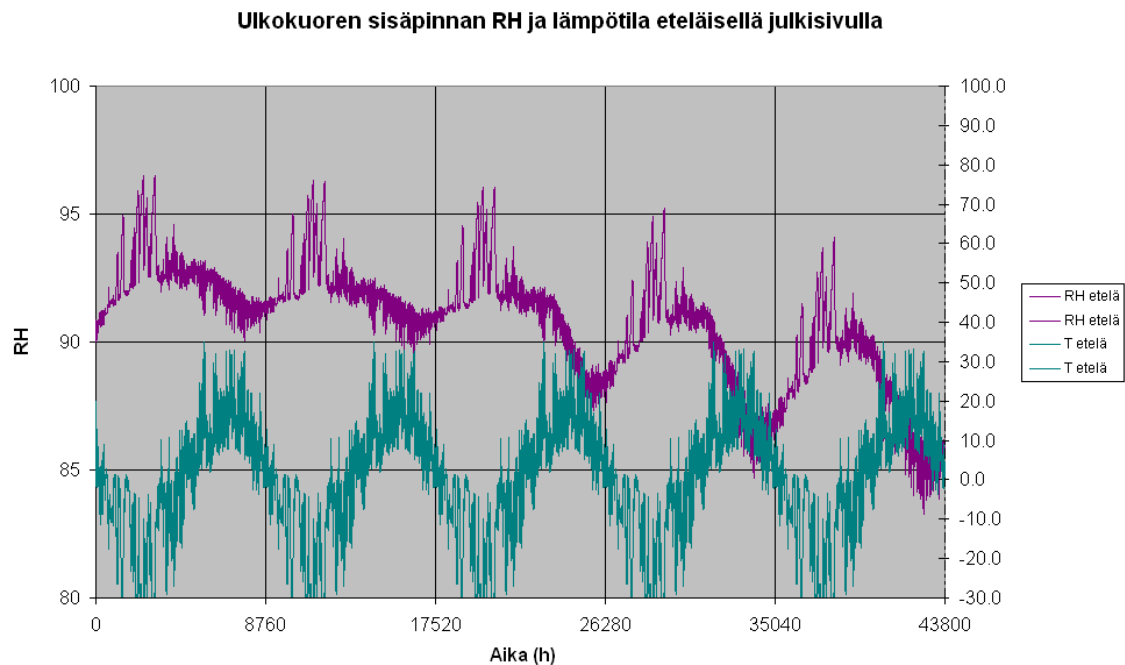
**Kuva 3.69** Kuvassa on esitetty Karasjoen koillisjulkisivun kuukausittaiset kosteusvirrat ( $\text{kg/m}^2/\text{kk}$ ) laskentajakson aikana eri rajapinnoissa. Negatiivinen arvo tarkoittaa sisältä ulospäin suuntautuvaa virtausta ja positiivinen sisälle päin tapahtuvaa virtausta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

Suhteellista kosteutta tarkasteltiin pisteessä P2 sekä Karasjoen koillis- että eteläjulkisivulla. Koillisjulkisivulla (Kuva 3.70) suhteellinen kosteus oli suurimmillaan 95 % ja vähän yli kuitenkin laskien loppua kohden. Suhteellisen kosteuden minimissä laskua tapahtui laskenta jakson aikana enemmän. Eteläisellä julkisivulla (Kuva 3.71)

suhteellinen kosteus käyttäytyy samalla tavalla, kosteudet vain olivat hieman pienempiä. Kesäkausilla eteläisellä julkisivulla suhteellisessa kosteudessa oli enemmän vaihtelua kuin koillisjulkisivulla, johtuen eteläisen julkisivun voimakkaammasta auringon lämmittävästä vaikutuksesta.



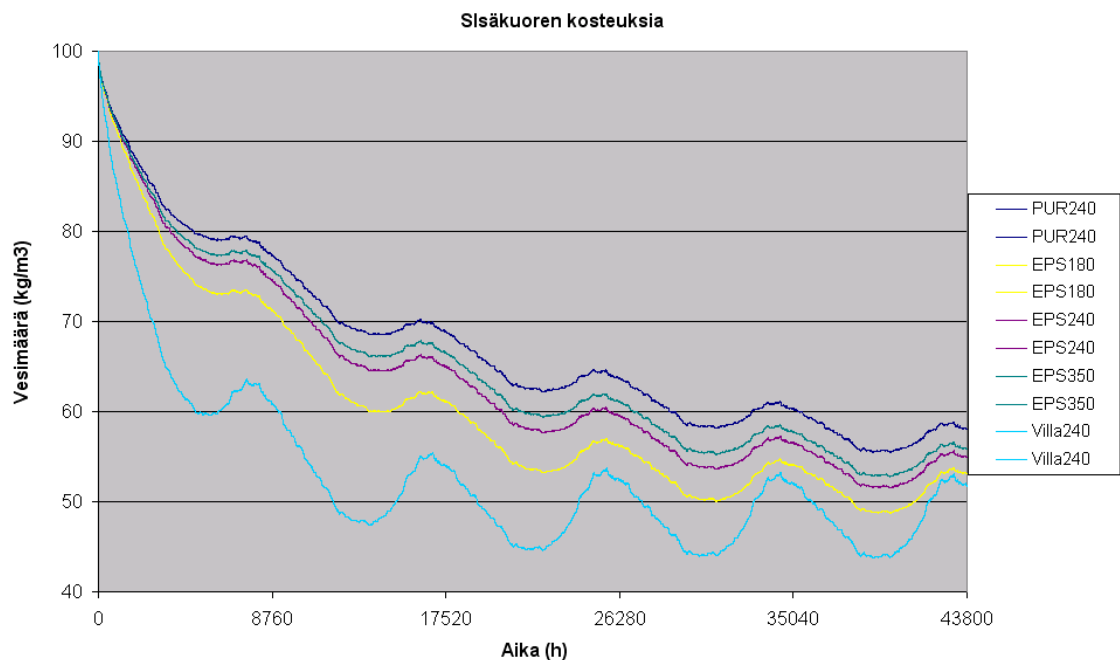
**Kuva 3.70** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen koillisjulkisivulla.



**Kuva 3.71** Kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua pisteessä P2 Karasjoen eteläjulkisivulla.

### 3.2.10. Sisäkuoren kosteuspitoisuuksista

Sisäkuoren kosteuspitoisuuksia tarkasteltiin erilaisilla eristepaksuuksilla nollajulkisivulla. Oheisessa kuvassa (Kuva 3.72) on esitetty sisäkuoren keskimääräisen kosteuspitoisuuden kehittymistä laskentajakson aikana. Villaeristeellä eristepaksuuden muutos ei aiheuttanut merkittäviä eroja, joten siitä on esitetty vain 240 mm eristeen kosteuskäyttäytyminen. Tiiviimmillä PUR- ja EPS-eristeillä sisäkuoren kuivuminen tapahtuu hitaammin ja esimerkiksi ensimmäisen vuoden jälkeen sisäkuoressa noin  $15 \text{ kg/m}^3$  vettä enemmän villaan verrattuna. Laskennan lopussa erot tasoittuivat ja viidennen vuoden lopussa kaikki ratkaisut olivat noin  $7 \text{ kg/m}^3$  sisällä.



**Kuva 3.72** Kuvassa on esitetty erilaisille rakennetyypeille sisäkuoren keskimääräisen kosteuspitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) kehittymistä laskentajakson aikana nollajulkisivulla. Laskennan alkupäivä oli 1.10.2009.

### 3.2.11. Virtausnopeuden arviointia tuuletusurassa

Comsol-ohjelmalla tukittiin virtausnopeutta erilaisissa olosuhteissa, kun urituksena uran kokona oli  $25 \times 27 \text{ mm}$  k150. Laskentaa varten tehtiin kolme erilaista mallia, jotka ovat tarkemmin esitetty liitteessä B reunaehtoineen. Ensimmäisessä mallissa elementti oli 3 m korkea, ylä- ja alareunassa oli  $20 \times 50 \text{ mm}$  kokooja ura, johon ilma tuli ja poistui 12 mm halkaisijaltaan olevan putken kautta, jolloin tarkasteltavan osan leveydestä johtuen myös putkia oli k150 jaolla. Toinen malli oli karsitumpi versio, jossa oli mallinnettu vain pystyura johon ilma tuli ja poistui ilman kuristusta. Kolmas malli oli kuten ensimmäinen, mutta ilman oletettiin poistuvan ja tulevan yhtenäisen 7,5 mm korkean raon kautta ylä- ja alareunassa.



**Taulukko 3.43** Taulukossa on esitetty rakennetyypille US1 Comsol-ohjelmalla lasketut virtausnopeudet (m/s) erilaisissa olosuhteissa. Sisälämpötila oli koko ajan +21 °C. Auringon säteilyn vaikutusta ei huomioitu tuloksissa. Taulukossa on esitetty keskimääräinen virtausnopeus 1m korkeudella ja 2m korkeudella sekä näiden keskiarvo.

T <sub>u</sub> (°C)	Malli 1			Malli 2			Malli 3		
	1m	2m	ka	1m	2m	ka	1m	2m	ka
-15	0.0050	0.0044	0.005	0.0361	0.0453	0.041	0.0145	0.0248	0.020
-10	0.0042	0.0038	0.004	0.0329	0.0415	0.037	0.0128	0.0219	0.017
-5	0.0032	0.0035	0.003	0.0294	0.0377	0.034	0.0110	0.0187	0.015
0	0.0025	0.0020	0.002	0.0257	0.0339	0.030	0.0093	0.0160	0.013
5	0.0021	0.0013	0.002	0.0216	0.0294	0.026	0.0075	0.0131	0.010
10	0.001988	9.20E-04	0.001	0.0175	0.0243	0.021	0.0056	0.0100	0.008

Rakennetyypille US1 tehdyistä laskelmista (Taulukko 3.43) nähdään, 12 mm putkilla toteutettu ilmanotto ja poisto kuristivat virtausta huomattavasti verrattuna vapaammin virtaaviin malleihin 2 ja 3. Laskelmissa ei ole otettu huomioon auringon eikä tuulen vaikutusta. Auringon säteily kasvattaisi virtausnopeutta urituksessa, koska tällöin sisään virtaavan ilman ja uran pinnassa olevan lämpötilan ero kasvaisi.

Rakennetyypille US6 tehdyissä virtausnopeuslaskelmissa (Taulukko 3.44) havaittiin virtausnopeuden jäävän pienemmiksi kuin tyyppillä US1. Tuloksista havaitaan, että vapaammin virtaavilla malleilla 2 ja 3 saavutetut virtausnopeudet olivat noin 30..40 % pienemmät kuin rakennetyypillä US1. Sen sijaan tuuletusputkien kuristamalla tapauksella (Malli 1) US1 virtausnopeuteen ei juuri ollut vaikutusta.

**Taulukko 3.44** Taulukossa on esitetty rakennetyypille US6 Comsol-ohjelmalla lasketut virtausnopeudet (m/s) erilaisissa olosuhteissa. Sisälämpötila oli koko ajan +21 °C. Auringon säteilyn eikä tuulen vaikutusta huomioitu tuloksissa. Taulukossa on esitetty keskimääräinen virtausnopeus 1 m korkeudella ja 2 m korkeudella sekä näiden keskiarvo.

T <sub>u</sub> (°C)	Malli 1			Malli 2			Malli 3		
	1m	2m	ka	1m	2m	ka	1m	2m	ka
-15	0.0026	0.0058	0.004	0.0198	0.0333	0.027	0.0047	0.0225	0.014
-10	0.0029	0.0050	0.004	0.0185	0.0303	0.024	0.0039	0.0200	0.012
-5	0.0028	0.0025	0.003	0.0172	0.0270	0.022	0.0031	0.0175	0.010
0	0.0021	0.0036	0.003	0.0156	0.0236	0.020	0.0018	0.0151	0.008
5	0.0017	0.0031	0.002	0.0139	0.0200	0.017	0.0017	0.0125	0.007
10	0.001328	2.46E-03	0.002	0.0118	0.0159	0.014	0.0011	0.0097	0.005

Tuulenpaineen vaikutusta arvioitiin rakennetyypille US6 korvaamalla sisääntulossa ”open boundary, normal stress = 0 Pa” reunaehdolla ”inlet, pressure = 2 Pa, no viscous stress” reunaehdolla. Tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 3.45). Tulosten perusteella paine-eron myötä lämpötilan vaikutus virtausnopeuteen pieneni. Virtausnopeudet kasvoivat myös huomattavasti, eniten vapaammin virtaavilla malleilla 2 ja 3.

**Taulukko 3.45** Taulukossa on esitetty rakennetyypille US6 tehdyn virtauslaskennan tulokset, kun luonnollisen konvektion lisäksi on huomioitu 2 Pa:n suuruinen paine-ero. Muuten olosuhteet yhteneväiset

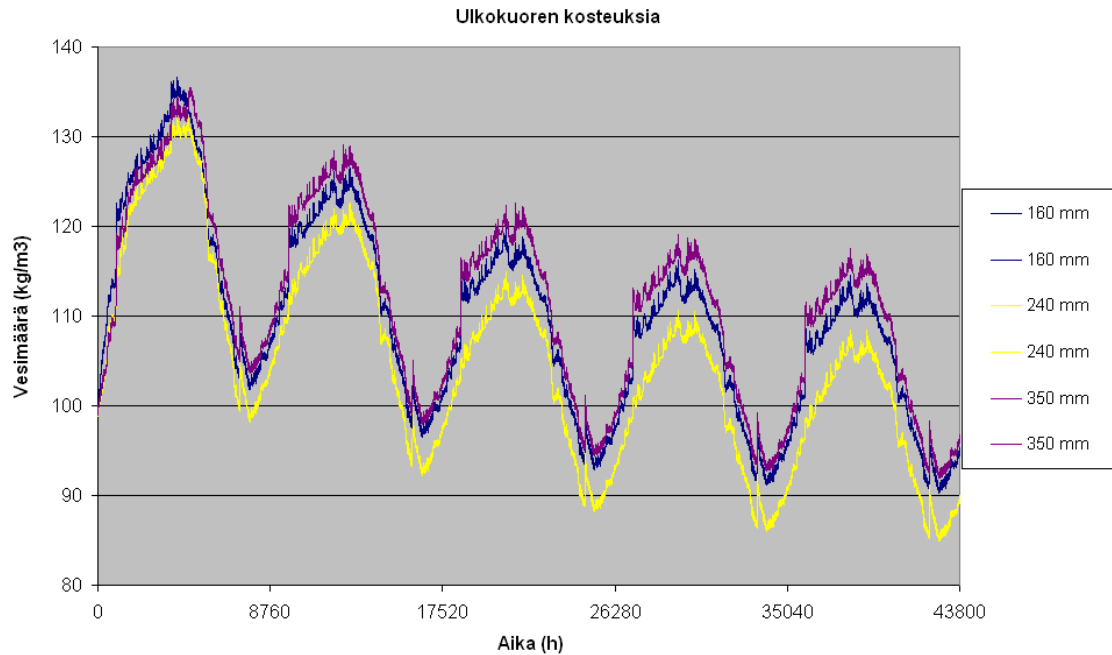
$T_u$ (°C)	Malli 1			Malli 2			Malli 3		
	1m	2m	ka	1m	2m	ka	1m	2m	ka
-15	0.0051	0.0081	0.007	0.0475	0.0840	0.066	0.0175	0.0589	0.038
-10	0.0051	0.0073	0.006	0.0473	0.0825	0.065	0.0175	0.0583	0.038
-5	0.0051	0.0070	0.006	0.0471	0.0809	0.064	0.0176	0.0576	0.038
0	0.0052	0.0070	0.006	0.0470	0.0794	0.063	0.0177	0.0570	0.037
5	0.0053	0.0072	0.006	0.0469	0.0780	0.062	0.0177	0.0564	0.037
10	0.0054	0.0072	0.006	0.0469	0.0770	0.062	0.0178	0.0558	0.037

Tuloksien perusteella hyvin toteutettuna uritukseen on mahdollista saada aikaan virtaus, jolla on selvä kuivattava vaikutus. Eristekerroksen paksuntaminen heikentää hieman luonnollisen konvektion vaikutusta, sillä tällöin ulkoilman ja uran pintojen välinen lämpötilaero pienenee ja sitä kautta myös lämpötiloista aiheutuva noste. Tuloksista puuttuu auringon säteilyn vaikutus, joka todellisuudessa kasvattaisi luonnollisesta konvektiosta aiheutuvaa virtausta.

### 3.2.12. Yhteenvedo tuloksista

Tuloksissa kaikilla rakenteilla oli yhteistä, että Espoon eteläjulkisivulla vuositason nettokuivuminen jäi pieneksi, sillä syksyn sateet kastelivat rakennetta suunnilleen saman verran kuin kesä kuivatti. Muuten kaikki rakenteet kuivuivat vaihtelevalla nopeudelle ilman tuuletustakin. Espoon eteläjulkisivulla viistosade oli sen verran voimakas, että se aiheutti ulkokuoren pysymisen kosteana koko tarkastelujakson ajan.

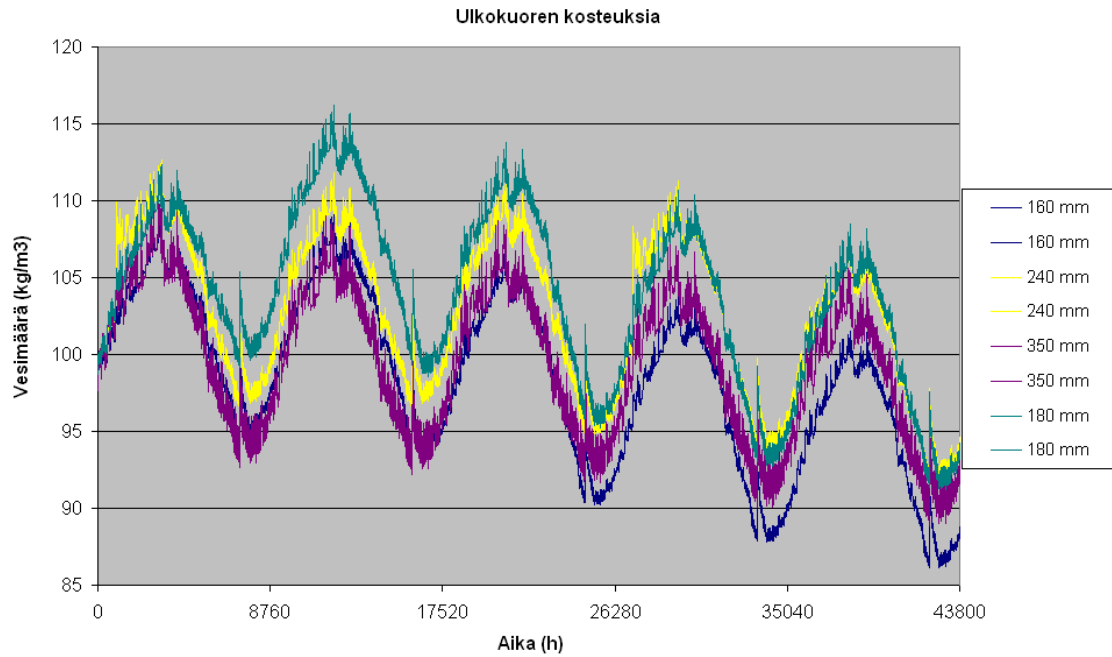
Eristepaksuuden kasvattamisen merkityksen selventämiseksi on seuraavissa kuvissa esitetty villa-, EPS- ja PUR-eristeisen BSW-elementin ulkokuoren keskimääräisiä kosteuksia eristyspaksuuden vaihdellessa. Villaeristeisellä BSW-elementillä ulkokuoren kosteuspitoisuudet erilaisilla eristevahvuuksilla näkyy kuvassa (Kuva 3.73). Kuvasta voidaan todeta, että eristepaksuuden kasvattamisella ei ollut merkittävää vaikutusta ulkokuoren keskimääräisen kosteuteen. 240 mm eristevahvuudella ulkokuori pysyi hieman kuivempana ja 350 mm eristepaksuudella kosteimpana. Kaikilla ratkaisuilla rakenne kuivui ja parin viimeisen laskentavuoden aikana alkoi asettua haarukkaan 90...110 kg/m<sup>3</sup>. Villaeristekerroksen vesipitoisuuteen eristepaksuuden kasvattaminen ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia (Kuva 3.76).



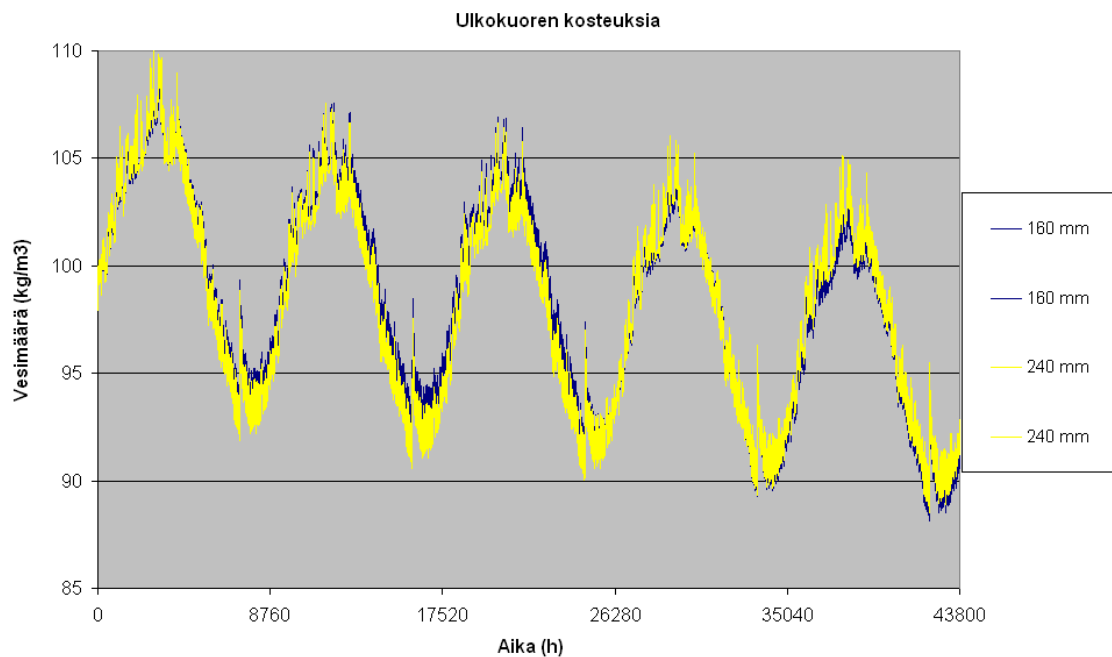
**Kuva 3.73** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia laskentajakson aikana villaeristeiselle SW-elementille, kun eristyspaksuus oli 160 mm, 240 mm ja 350 mm. Julkisivu oli Karasjoella ja osoitti koilliseen. Tuloksissa ei ole huomioitu tuuletuksen vaikutusta.

EPS-eristeisillä elementeillä (Kuva 3.74) ei myöskään eristepaksuuden vaihtelulla ollut merkittävää vaikutusta ulkokuoren keskimääräisiin kosteuksiin. Karasjoen koillisjulkisivuilla kaikilla EPS-vahvuuksilla rakenne kuivui ja laskennan lopussa keskimääräiset kosteudet olivat välillä  $90\text{--}105\text{ kg/m}^3$ . Verrattuna villaeristeiseen elementtiin EPS-eristeisessä kuivuminen alkoi vasta kahden vuoden kuluttua. EPS-kerroksen vesipitoisuuteen (Kuva 3.77) eriste paksuuden kasvattamisella oli myönteinen vaikutus. Paksummilla eristekerroksilla kosteuspitoisuudet eristetilassa jäivät pienemmiksi kuin 160 mm eristekerroksella. Kesäisin kosteuspitoisuudet olivat suunnilleen samat, mutta talvisin paksummat eristeet pysyivät keskimäärin kuivempina.

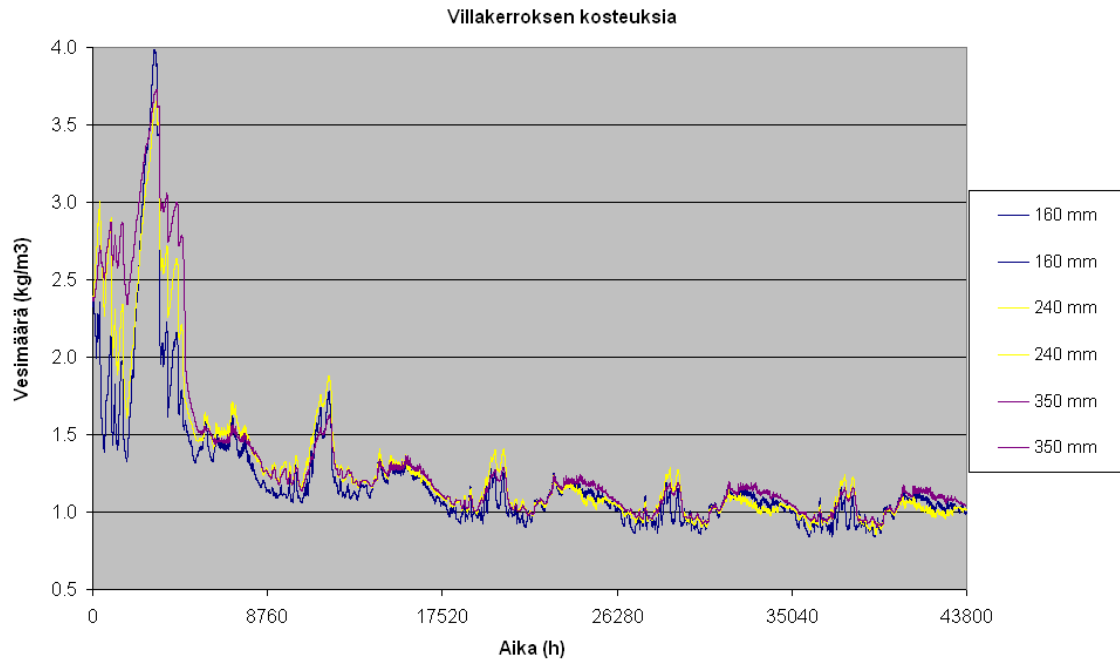
PUR-eristeisillä elementeillä (Kuva 3.75) eristepaksuuden kasvattaminen ei aiheuttanut oikeastaan minkäänlaista muutosta ulkokuoren kosteuskäyttäytymiseen. Rakenne lähti kuivumaan alusta alkaen molemmille lasketuilla eristevahvuuksilla. Laskennan lopussa ulkokuoren keskimääräinen kosteus oli asettunut samaan kuin EPS-eristeisillä, eli  $90\text{--}150\text{ kg/m}^3$ . Uretaanikerroksen kosteuksia on esitetty kuvassa (Kuva 3.78). Laskennan alussa ohuempi uretaanikerros pysyi kosteampana, mutta ero tasoittui laskennan loppua kohden ja kääntyi osin päinvastaiseksi. Maksimikosteus oli molemmilla tapauksilla lähes sama, mutta paksumpi eristekerros pysyi pidempään kosteampana ennen kuin palasi minimikosteuden tasolle.



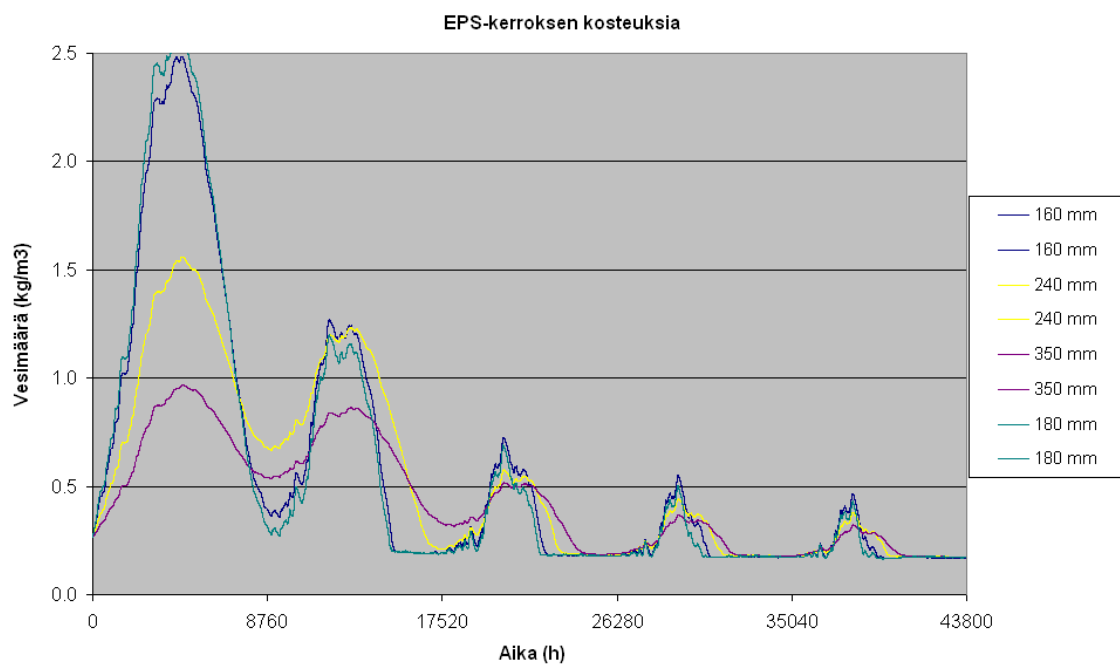
**Kuva 3.74** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia laskentajakson aikana EPS eristeiselle SW-elementille, kun eristyspaksuus oli 160 mm, 240 mm ja 350 mm sekä 180 mm ns. harmaata EPS:ä. Julkisivu oli Karasjoella ja osoitti koilliseen.



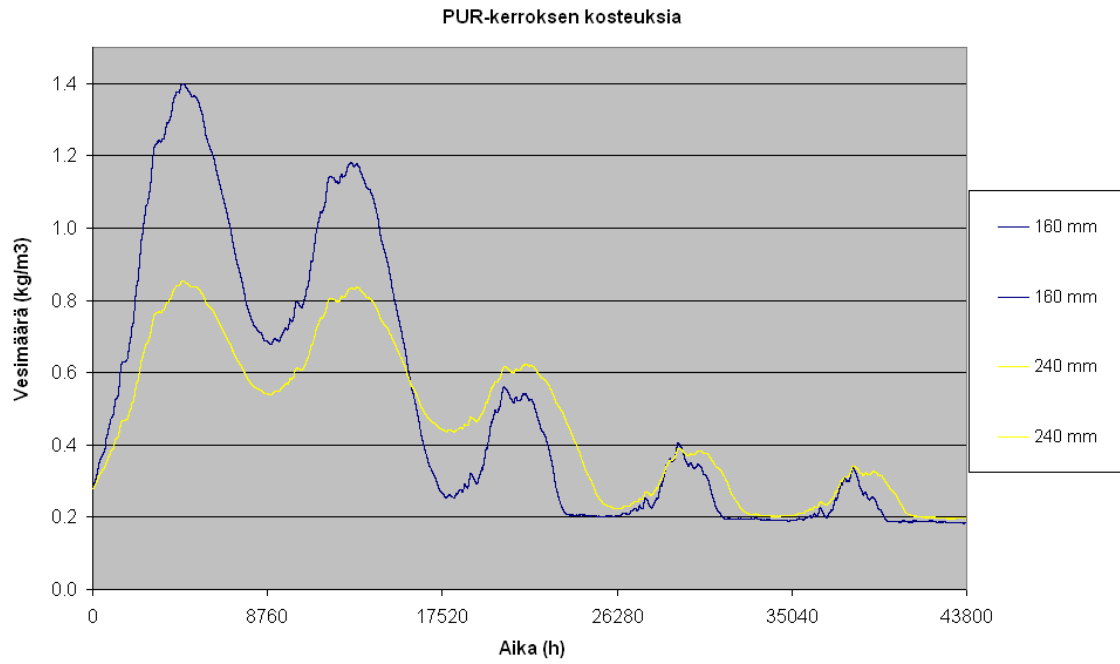
**Kuva 3.75** Kuvassa on esitetty ulkokuoren keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia laskentajakson aikana EPS eristeiselle SW-elementille, kun eristyspaksuus oli 160 mm ja 240 mm. Julkisivu oli Karasjoella ja osoitti koilliseen.



**Kuva 3.76** Kuvassa on esitetty tuulettamattomina Karasjoen koillisjulkisivun villakerroksen keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri eristevahvuuksilla.



**Kuva 3.77** Kuvassa on esitetty tuulettamattomina Karasjoen koillisjulkisivun EPS-kerroksen keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri eristevahvuuksilla.



**Kuva 3.78** Kuvassa on esitetty tuulettamattomina Karasjoen koillisjulkisivun PUR-kerroksen keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri eristevahvuuksilla.

## 4. TULOSTEN ANALYSOINTI

### 4.1. Yleistä

Edellisen luvun tulokset on laskettu pääosin WUFI:lla ja joitain tuloksia, kuten tuuletusta, on laskettu lisäksi Excelillä WUFI:n tulosten perusteella. Tuloksia laskettaessa yritettiin käyttää WUFI:ssa mahdollisimman samanlaisia asetuksia kaikille laskentatapauksille, mutta elementtijakoa jouduttiin toisinaan muuttamaan samankin rakennetyypin sisällä numeerisesti paremman ratkaisun valossa. Esimerkiksi toisinaan karkean hilan käyttö antoi laskentaraportin valossa parempia tuloksia kuin tiheämmän hilan käyttö.

WUFI raportoi laskennan tilasta ja määräävinä kriteereinä tulosten luotettavuudelle käytettiin konvergointivirheiden määrää sekä kosteustasapainoa. Konvergointivirhe sinänsä ei vielä WUFI:ssa kerro suoraan tulosten laadusta mitään. Esimerkiksi konvergointivirhe syntyy siitä, kun tietyllä hetkellä saavutetaan maksimi iteraatioiden määrä, mutta tulos ei vielä ole konvergoitunut toleranssin sisälle. Saattaa kuitenkin olla, että poikkeamaa sallitusta on hyvin pieni. Sen vuoksi kriittisemmin suhtauduttiin WUFI:n ilmoittamaan kosteustasapainoon eri puolella rakennetta. Kaikki tulokset yritettiin saada sille tasolle, että konvergointi virheitä olisi aivan maksimissaan 15..20 /vuosi ja kosteustasapainossa vain hyvin vähän heittoa (maks.  $\sim 0,03 \text{ kg/m}^3$ ).

Tuloksiin vaikuttivat luonnollisesti materiaaliarvot, ilmastoparametrit, alkuarvot ja reunaehdot sekä käytetystä elementtijaosta. WUFI:n manuaalin mukaan rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kosteuskäyttäytyminen ja kosteuspitoisuudet eivät yleensä ole kovin herkkiä materiaalien tiheyden, huokoisuuden, ominaislämpökapasiteetin eikä lämmönjohtavuuden suhteen. Tässä työssä ei tutkittu diffuusiovastuskertoimen muuttamisen vaikutusta tuloksiin. Elementtijako haettiin sen sijaan sellaiseksi, että laskentaraportin valossa tulosten laatu täytti edellisessä kappaleessa mainitut kriteerit.

Tuloksissa seurattiin ulkokuoren sekä eristeen keskimääräistä kosteutta, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta eristeen ja ulkokuoren rajapinnassa, kosteusvirtoja eri rajapinnoissa sekä tulosten perusteella arvioitiin tuuletuksen poistamaa kosteusmäärää sekä arvioitiin valitussa urituksessa saavutettavaa virtausnopeutta. Sisäkuoren keskimääräisten kosteuspitoisuuksien seuranta tehtiin muutamilla rakenteilla nollajulkisivulla.

## 4.2. Vesipitoisuudesta ja suhteellisesta kosteudesta

Ulkokuoren keskimääräiset vesimäärät pienenevät kaikilla tutkituilla rakennetyypeillä ilman tuuletuksen vaikutustakin, paitsi silloin kun kyseessä oli Espoon eteläinen julkisivu. Eteläisellä julkisivulla viistosateen rasitus oli niin suuri, että se riitti kastelemaan vuodesta toiseen ulkokuoren lähes maksimikosteuteensa ( $145..146 \text{ kg/m}^3 \sim \text{RH } 99,5$ ). Toisaalta myös eteläisellä julkisivulla loppukesästä saavutettu minimikosteus ulkokuorelle pieneni vuosivuodelta.

Eristepaksuuden kasvattamisella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta ulkokuoren kosteuspitoisuuteen laskelmien valossa. Sen sijaan jos villan tilalla käytettiin tiiviimpää EPS:ä tai PUR:a pysyi ulkokuori hieman kuivempana. EPS:n ja PUR:n välinen ero oli pienempi kuin ero villaan nähden. Ulkokuoren kuivempana pysyminen johtui EPS:n ja PUR:n paremmasta vesihöyrynvastuksesta, jolloin rakenteen sisältä kosteusvirrat ulospäin olivat pienemmät. Lisäksi EPS-eristeisillä ratkaisuilla ulkokuoren kuivuminen alkoi vasta toisen vuoden jälkeen. Oletettavasti syynä on EPS:n vesihöyrynvastus, joka hidastaa kosteuden kulkeutumista ulkokuoreen. Tällöin kahtena ensimmäisenä vuonna sisältäpäin tuleva kosteusvirta oli niin pieni, että se ei riittänyt nostamaan ulkokuoren keskimääräistä vesipitoisuutta samalla tavalla kuin villalla, mutta toisaalta niin suuri, ettei se mahdollistanut ulkokuoren kuivumista. Toisen vuoden jälkeen sisältä ulospyrkivä kosteusvirta oli pienentynyt kuivumisen myötä sen verran, että myös ulkokuoren keskimääräinen kosteuspitoisuus alkoi laskea. PUR-eristeen tapauksessa kosteusvirta oli jo alkujaan niin pieni eristeen tiiviyn johdosta, että ulkokuoren keskimääräinen kosteuspitoisuus pieneni alusta alkaen.

Villaeristeisissä elementeissä tutkittiin myös alkukosteuden kasvattamisen vaikutusta suhteellista kosteutta 90 % vastaavasta  $2,39 \text{ kg/m}^3$  arvoihin  $4,5 \text{ kg/m}^3$  ja  $10 \text{ kg/m}^3$  Espoon pohjoisjulkisivulla ja nollajulkisivulla. Rakennetyypillä US1  $4,5 \text{ kg/m}^3$  kosteus määrä tasoittui laskennassa käytetyn kanssa vajaassa vuodessa nollajulkisivulla kun  $10 \text{ kg/m}^3$  vastaava tasoittuminen kesti noin puolitoista vuotta. Osaltaan pitkään keston vaikutti laskennan alkuhetki 1.10.2009 jolloin eriste joutui märkänä talvea vasten eikä näin ollen kuivunut juurikaan. Kesällä villa kuitenkin kuivui nopeaa ja normaalitapauksen ja kosteamman  $4,5 \text{ kg/m}^3$  välinen ero kuivui noin kahdessa kuukaudessa. Pohjoisjulkisivulla tulokset olivat samansuuntaisia ja erot nollajulkisivuun verrattuna suhteellisen pieniä, joten pohjoisjulkisivulla tarkempi tulosten esittely sivuutetaan.

Eristekerroksen kosteuspitoisuuksissa ei havaittu myöskään eristepaksuuden kasvattamisella olevan suuria vaikutuksia eristetilan keskimääräiseen kosteuteen. EPS-eristeillä paksuntaminen pienensi aavistuksen maksimi kosteutta. PUR-eristeillä paksumpi eriste pysyi hieman pidempään kosteana kuin ohuempi eriste maksimikosteuden pysyessä samana molemmissa tapauksissa. Kuitenkin eristerokoksen kosteuksia lukiessa on syytä muistaa kohdassa 3.1.2.2 tehty korjaus eristeiden kosteuskapasiteetteihin, joka näkyy keskimääräisiä kosteuksia tarkasteltaessa ylisuurina vesimäärinä etenkin laskennan alkuvaiheessa. Toisaalta sama ilmiö heijastuu



myös suhteellisen kosteuden käyriin, joissa suhteellinen kosteus nousee korjauksen myötä vain hyvin vähän yli 98 % (n. 0,05 %).

Laskelmien perusteella kaikista rakenteista laskennan alussa käytetty läpi rakenteen vallinnut 90 % suhteellinen kosteus poistui laskentajakson aikana. Sisäkuoreen jäi rakennetyypistä riippuen suunnilleen betonin suhteellista kosteutta 40..60 % vastaava vesimäärä (40...58 kg/m<sup>3</sup>). Sisäkuoren kosteus laski nopeimmin villaeristeisillä ratkaisuilla ja ensimmäisen vuoden jälkeen villaeristeisessä BSW-elementissä keskimääräinen kosteus oli lähes 20 kg/m<sup>3</sup> pienempi kuin EPS- tai PUR-eristeisessä. Kuivumiserot keskimääräisen kosteuden perusteella EPS- ja PUR-eristeiden välillä olivat pieniä verrattuna villaeristeeseen. Eristekerrokset kuivuivat myös laskentajakson aikana, myös Espoon eteläjulkisivulla, jossa tosin syksyn ja alkutalven aikana tapahtui kaikkein voimakkain kosteuspitoisuuden nousu.

EPS- ja PUR-eristeillä laskelmissa esiintyi usein tilanne, jossa eristeen suhteellinen kosteus oli suurimmillaan muutaman sentin päässä ulkokuoresta. Tämä tilanne esiintyi etenkin laskennan alkuvaiheessa ja korjaantui loppua kohden. Tämä eristeen sisällä oleva kosteus on rakennuskosteutta, joka pääsee liikkumaan eristeen sisällä hitaasti johtuen EPS:n ja PUR:n korkeasta vesihöyrynvastuksesta. Tämän vuoksi laskennan alkuaikana suhteellinen kosteus oli eristeen sisällä aika ajoin korkeampi kuin ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa. Tapauksesta riippuen eristekerroksen sisällä oleva rakennuskosteus oli poistunut kolmantena tai neljäntenä vuonna.

### 4.3. Tuuletuksen vaikutuksesta

Tuuletuksen vaikutusta arvioitiin Gertisin menetelmän avulla tuulettuville rakenteille. Etenkin eteläjulkisivuilla tuuletuksella oli laskelmien valossa selvä kuivattava vaikutus etenkin villaeristeillä. EPS- ja PUR-eristeillä kuivattava vaikutus jäi pienemmäksi Gertisin menetelmään tehdyn muutoksen vuoksi, jossa poistuvan kosteuden määrä laskettaessa uran pinta-alana käytettiin yhtä neljäsosaa todellisesta. Tämä tehtiin sen vuoksi, koska PUR- ja EPS-eristeet ovat villaa tiiviimpiä, jolloin uran eristepinnoilta ei kosteutta pysty poistumaan kovin nopeasti.

Muilla ilmansuunnilla tuuletuksen vaikutus jäi eteläjulkisivusta parhaimmillaan lähes puolet. Eristekerroksen paksuntamisella oli laskelmien valossa hienoinen tuuletuksen kautta poistuvaa kosteutta pienentävä vaikutus kaikilla eristetyypeillä. Tämä johtui osaltaan uran pinnan pysymisestä kylmempänä lämmöneristyskyvyn parantuessa sekä toisaalta myös eristeen paksunemisen myötä kasvaneesta vesihöyryn vastuksesta, jolloin kosteutta siirtyi vähemmän ja hitaammin sisältä ulospäin.

Tuuletuksen kosteudenpoistokykyä arvioitaessa virtausnopeutena urassa käytettiin vakiota 0,01 m/s. Tämän virtausnopeuden todenmukaisuutta arvioitiin Comsol-ohjelmalla. Laskentaa varten tehtiin kolme erilaista mallia (ks.liite B). Yleisesti virtausnopeuksista urituksessa kävi niin, että ulkoilman ollessa kylmempää myös virtausnopeus kasvoi johtuen suuremmasta lämpötilaerosta tuuletusuran pinnan ja

ulkoilman välillä. Auringon säteilyn tuuletusta tehostavaa vaikutusta ei otettu malleissa huomioon eikä myöskään tuulen vaikutusta.

Ensimmäisessä mallissa tuuletusta kuristivat putket, joista ilma pääsi ulkoa siirtymään sisälle päin. Toisessa mallissa ilma pääsi virtaamaan vapaimmin ja sen myötä myös virtausnopeudet urassa olivat suurimmat. Kolmas malli oli kahden edellisen välimuoto ja niinpä siinä virtausnopeudet olivat suuremmat kuin ensimmäisessä mallissa, mutta pienemmät kuin toisessa mallissa.

Eristepaksuuden kasvattaminen 160 millimetristä 240 mm:n pienensi virtausnopeuksia malleilla 2 ja 3, suurimmillaan jopa vajaat 40 %. Sen sijaan tuuletusputkien kuristamalla tapauksella 1 laskelmien perusteella eristepaksuuden kasvattaminen ei juuri vaikuttanut virtausnopeuksiin. Virtausnopeuden pieneneminen johtuu rakenteen parantuneen lämmönvastuksesta, jolloin eristeen ulkokerros on hieman viileämpi kuin ohuemmalla eristeellä ja näin ollen ulkoilman ja tuuletusuran pinnan välillä vallitsee pienempi lämpötilaero. Pienemmällä lämpötilaerolla ilman lämpenemisestä aiheutuva noste jää pienemmäksi ja sen myötä myös virtausnopeudet.

## 5. YHTEENVETO

Työ sisältää teoreettisen osan sekä käytännön sovellusosan, jossa teoriaosuutta soveltamalla arvioidaan BSW-elementtien kosteusteknistä toimintaa. Tässä työssä keskityttiin kosteustekniseen toimintaan kosteustasapainon kannalta eikä esimerkiksi mahdolliseen homeenkasvuun otettu kantaa. Tarkasteltavia rakenteita oli kaikkiaan 9 kappaletta, jotka käsiteltiin kaikki tuulettumattomana. Tuulettumattoman rakenteen tulosten avulla tehtiin arvio tuuletuksen kosteudenpoistokyvystä. Tuulettumattomissa uran tehollisena kokona käytettiin 25 x 27 mm ja urajakona k150. Lisäksi virtauslaskenta malleissa elementin ylä- ja alareunaan oletettiin 20 x 50 mm kokoojaura.

Teoreettisessa osassa esitetään rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen vaikuttavat asiat sekä matemaattisia esityksiä osan asioista laskemista varten. Lämpötekniikkaa käsittelevässä osassa käytiin läpi lämmönsiirtymisen eri muodot, niiden laskentaa sekä U-arvon laskentaa BSW-elementille. Kosteusteknisestä toiminnasta esitettiin vastaavasti kosteuden siirtymis- ja varastoitumismuodot rakenteisiin sekä erilaiset kosteusrasitukset ulkoseinärakenteille.

Soveltavassa osuudessa laskettiin yhdeksän erilaisen BSW-ulkoseinärakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä sekä Espoon että Karasjoen ilmastossa. Laskelmissa keskityttiin tarkastelemaan keskimääräisiä kosteuspitoisuuksia, kosteusvirtoja sekä suhteellista kosteutta tietyissä pisteissä ja materiaalikerroksissa. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi ulkoilman olosuhteista otettiin huomioon viistosade sekä auringon säteilyn vaikutus WUFI:lla tehdyissä laskelmissa. Comsol-ohjelmalla tehdyissä laskelmissa keskityttiin nollajulkisivuun ja siinä lämpö- ja virtaustekniikkaan.

Nollajulkisivua, eli julkisivua johon ei kohdistu viistosadetta eikä auringonpaistetta, tarkasteltaessa kaikilla rakenteilla tapahtui viiden vuoden laskentajakson aikana rakennuskosteuden kuivumista eristekerroksessa sekä molemmissa betonikuorissa. Kuivumisen nopeus vaihteli hieman rakenteessa käytetyn eristeen tyyppin mukaan siten, että tiiviimmillä EPS- ja PUR-eristeillä kuivuminen oli hitaampaa. Toisaalta, EPS- ja PUR-eristeillä myös kosteuspitoisuudet olivat pienemmät. Esimerkiksi ulkokuoren keskimääräistä kosteutta tarkasteltaessa 240 mm eristeellä ilman tuuletuksen huomioimista, villan tapauksessa ensimmäisenä vuonna vesimäärä oli suurimmillaan yli 130 kg/m<sup>3</sup>, kun taas EPS:n tapauksessa ulkokuoren keskimääräinen kosteus pysyi noin 110 kg/m<sup>3</sup> muutaman ensimmäisen vuoden ajan, jonka jälkeen vasta maksimikosteus kääntyi laskuun. Lisäksi EPS- ja PUR-eristeisillä rakenteilla vuodenajoista johtuva kosteuspitoisuuksien vaihtelu jäi pienemmäksi verrattuna villaeristeisiin ratkaisuihin.

Espoon ilmastossa eteläjulkisivulla ilman tuuletusta kaikilla rakenteilla eristetila pysyi kosteamana verrattuna muihin ilmansuuntiin ja ilmasto-olosuhteisiin. Lisäksi

rakenteesta riippumatta ulkokuori kastui vuodesta toiseen samalle tasolle viistosateiden vaikutuksesta, kun tuuletusta ei huomioitu. Ulkokuoren keskimääräinen minimikosteus sen sijaan laski laskennan loppua kohden. Gertisin menetelmällä arvioitua tuuletuksen mukanaan poistamat kosteusmäärät olivat varsinkin eteläjulkisivulla sitä luokkaa, että niitä voidaan käyttää hyväksi rakenteen kuivauksessa. Tosin, tuuletuksen hyöty pieneni oleellisesti laskelmien perusteella, kun eristeeksi vaihdettiin villan tilalle tiiviimpi EPS tai PUR. Pieneneminen johtui Gertisin menetelmään tehdystä muutoksesta, jolla yritettiin huomioida sitä, että tiiviimpien EPS- ja PUR-eristeiden tapauksessa eristeessä oleva kosteus siirtyy sen verran hitaammin, että eristeen uran vastaiseen pintaan ei ehdi siirtyä kosteutta samaa tahtia kuin uritus sitä kuivattaa.

Villaeristeen tapauksessa tutkittiin korkeamman alkukosteuden vaikutusta, jolla huomioitiin tilannetta, jossa eristetila pääsee kastumaan rakennusaikana esim. puutteellisen suojauksen johdosta. EPS- ja PUR-eristeillä tätä tarkastelua ei tehty, koska niihin ei sateesta pääse vesi samalla tavalla imeytymään. Korkeampi alkukosteus palautui laskennassa käytetyn kanssa samalle tasolle vajaasta vuodesta puolentoista vuoden kuluessa. Laskennan alkuhetkestä, lokakuun alku, johtuen tämä tasoittumisaika oli pidempi, sillä käytännössä tasoittuminen tapahtui kesällä parin kuukauden aikana. Vaikka villaeristeisetkin ratkaisut laskelmien valossa näyttävät kuivuvan suhteellisen hyvin ilman tuuletusta, on tuuletuksella kuitenkin tällaisissa tapauksissa selvä kuivattava vaikutus villatilan kosteuteen.

Kosteuspitoisuuden laskua tapahtui siis kaikilla rakenteilla kaikilla muilla julkisivuilla paitsi Espoon eteläjulkisivulla. Laskelmien perusteella kaikista rakenteista voidaan rakennuskosteuden todeta poistuvan muutamassa vuodessa ilman tuuletusta, kunhan rakenne ei ole altis voimakkailla kosteusrasituksille. Voimakkaan kosteusrasituksen tapauksessa, kuten viistosade Espoon eteläjulkisivulla, ulkokuoren kosteus pysyy selvästi korkeampana kuin ilman kosteusrasitusta. Tällaisissa tapauksissa, joissa esiintyy voimakasta kosteusrasitusta, on rakenteen kuivumista edesautettava esimerkiksi varmistamalla riittävä tuuletus tai suojaamalla rakenne suuremmilta kosteusrasituksilta.

EPS- ja PUR-eristeillä ulkokuori pysyi pääosin kuivempana kuin villaeristeen tapauksessa. Lisäksi EPS- ja PUR-eristeiden tapauksessa tuuletuksen kautta poistuvaksi arvioitu kosteusmäärä jäi selvästi pienemmäksi kuin villaeristeellä. Näiden tulosten valossa EPS- ja PUR-eristeillä voisi toteuttaa toimivia ratkaisuja ilman tuuletusta, mikäli ulkokuoreen ei kohdistu merkittäviä kosteusrasituksia. Esimerkiksi Espoon eteläjulkisivulla kaikilla rakennetyypeillä ulkokuoren keskimääräinen maksimi vesimäärä ( $\text{kg/m}^3$ ) pysyi samana vuodesta toiseen voimakkaista viistosateista johtuen, vaikka minimi vesimäärä pieneni laskennan loppua kohti. Kuitenkin tapauksissa, joissa ulkokuori joutuu alttiiksi suurille kosteusrasituksille, tuuletuksella voidaan hieman alentaa ulkokuoren kosteustilaa, vaikka EPS- ja PUR-eristeillä tuuletuksen hyöty jää villaeristettä vähäisemmäksi. Tällöin kuitenkin syntyy palavien EPS- ja PUR-eristeiden tapaukselle palolle reitti levitä ulkokuoren taustalla, jolloin aukot joudutaan suojaamaan palolta esimerkiksi villakaistoilla. Toinen vaihtoehto olisi ulkokuoren pinnoittaminen

sopivasti, jotta ulkopuoliset kosteusrasituksen pienenisivät. Tämän vaihtoehdon mahdollisesti oleellisiakin vaikutuksia rakenteiden kosteusjakaumiin ja pitoisuuksiin ei kuitenkaan tutkittu tämän työn puitteissa.

Sisäkuoren kosteus kuivui villaeristeisillä rakenteilla nopeampaa kuin EPS- tai PUR-eristeillä. Villaeristeillä suurin osa kuivumisesta tapahtui ensimmäisen vuoden aikana ja toisen vuoden aikana jo lähes saavutettiin tasapaino tilanne ympäröivän ilmaston kanssa. Vastaavasti EPS- ja PUR-eristeiden tapauksessa kuivumista tapahtui koko laskentajakson ajan. Ensimmäisen vuoden jäljiltä EPS- ja PUR-eristeiset rakenteiden sisäkuoret olivat n. 15...20 kg/m<sup>3</sup> kosteampia villaeristeiseen verrattuna. EPS- ja PUR-eristeiden välillä erot jäivät pienemmäksi, mutta kuitenkin eristekerroksen paksuntuessa sisäkuoren kuivuminen hidastui eristekerroksen kasvaneen vesihöyrynvastuksen myötä. Sisäkuori kuitenkin kuivui alkutilanteeseen nähden hieman yli 20 kg/m<sup>3</sup> ensimmäisen vuoden aikana EPS- ja PUR-eristeillä. Kuivumisen ollessa kuitenkin villaeristeisiä ratkaisuja selvästi hitaampaa EPS- ja PUR-eristeillä, voi joissain tapauksissa ilmetä ongelmia pinnoitteiden kanssa, mikäli pinnoitus tehdään liian aikaisin.

Tuuletuksen kosteuden poistoa arvioitaessa Gertisin menetelmällä havaittiin virtausnopeudella olevan suuri vaikutus poistuvan kosteuden määrään. Comsol-ohjelmalla tehtyjen virtauslaskelmien perusteella tapaus, jossa tuuletusilma tulee kanavistoon halkaisijaltaan 12 mm putkien kautta, jäivät saavutettavat tilavuusvirrat oleellisesti pienemmiksi urituksessa kuin vapaammin virtaavissa ratkaisuissa. Esimerkiksi, jos ilma pääsee tuuletusuriin elementtien saumasta yhtenäisen 7,5 mm korkean läpi elementin jatkuvan raon läpi, kasvavat tuuletusvirrat laskelmien perusteella jopa 3...4 kertaa suuremmiksi putkitapaukseen verrattuna. Yhtenäisellä 7,5 mm raolla virtausnopeudet jäävät kuitenkin vielä noin puoleen kuristamattomasta tapauksesta. Voidaan siis todeta, että tuuletuksen suunnittelulla ja toteutuksella on selvä vaikutus käytännössä saavutettaviin virtauksiin. Rakennetyypille US6 kokeiltiin lisäksi 2 Pa:n suuruisen paine-eron vaikutusta ilmapirtauksiin. Paine-eron vallitessa virtausnopeudet kasvoivat selvästi ja samalla luonnollisen konvektion merkitys pieneni. Paine-erot ovat kuitenkin alati muuttuvia talon ympärillä, joten käytetty 2 Pa:n suuruinen paine-ero ei välttämättä kuvaa mitään jatkuvaa tilannetta. Hitailla virtausnopeuksilla ilma kyllästyi nopeasti uraan tulon jälkeen, ja näin ollen suurin kuivattava vaikutus keskittyi elementin alareunaan.

Eri rakenteilla seurattiin myös kosteusvirtojen käyttäytymistä eri rajapinnoissa laskentajakson aikana Espoon eteläjulkisivulla sekä Karasjoen koillisjulkisivulla. Molemmissa tapauksissa ulkopinnassa tapahtui suurimmat kosteuden liikkeet johtuen viistosateista sekä auringon säteilystä. Eristeen sisä- ja ulkopinnassa kosteusvirrat olivat maltillisempia kaikilla rakenteilla. Eristeen rajapinnoissa tapahtuvat kosteusvirrat asettuivat eristemateriaalista riippuen laskennan lopussa tilaan, jossa kesäkuukausina kosteusvirrat olivat pääasiassa ulkoa sisäänpäin ja talvella sisältä ulospäin. Rakenteen ulkopinnassa vastaavasti kesäaikaan kosteusvirrat olivat sisältä ulospäin ja syys- sekä talvisaikaan ulkoa sisäänpäin. Rakenteiden sisällä eristeen rajapinnoissa tapahtuvien

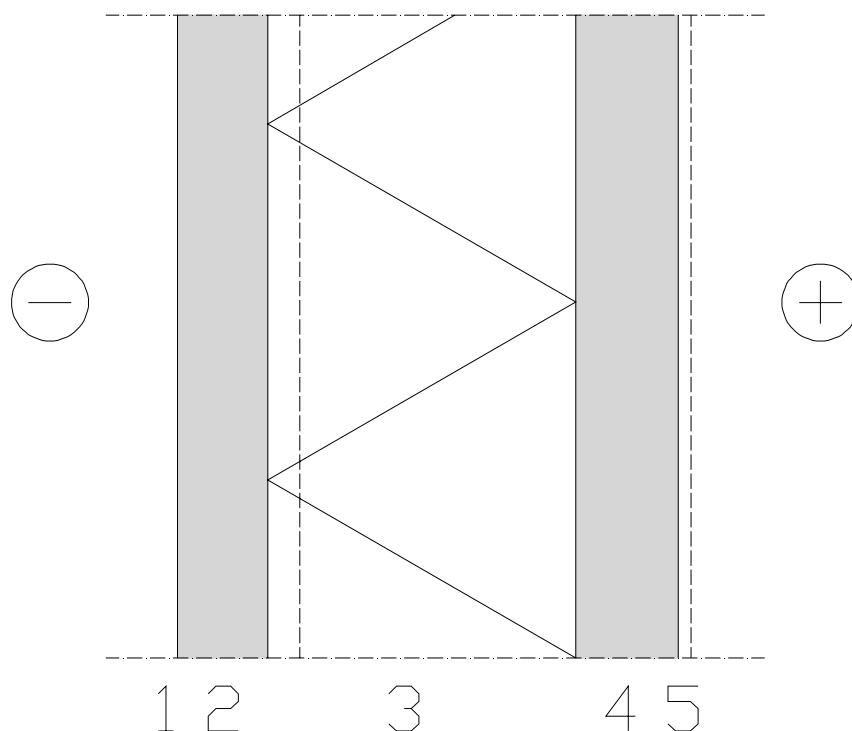
kosteusvirtojen saldo vuoden ajalta oli kuitenkin ulospäin. Ulkopinnassa vuositason nettovirtaus oli myös yleensä ulospäin, mutta joissain tapauksissa ulkopinnasta kosteutta virtasi enemmän sisään kuin ulos.

Suhteellista kosteutta tarkasteltiin ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa (piste P2) kaikilla eristeillä. EPS- ja PUR-eristeillä suhteellisen kosteuden vaihtelu oli pienempi vuodenaikojen mukaan, mutta toisaalta yleensä myös keskimääräinen suhteellinen kosteus oli pienempi. Espoon eteläjulkisivulla tilannetta hieman vääristää eristeisiin tehty kosteuskapasiteetin muutos, joka käytännössä estää suhteellisen kosteuden nousun yli 98 % EPS- ja PUR-eristeillä. Muilla julkisivuilla ja ilmasto-oloilla ylärajaa ei EPS- ja PUR-eristeillä lähennelty kuin satunnaisesti ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa. Kesäaikaan villaeristeillä suhteellisessa kosteudessa päästiin toisinaan 70 % tai alle lukemiin, kun EPS- ja PUR-eristeillä alimmillaan Espoossa noin 90 % ja Karasjoella noin 85 %. EPS- ja PUR-eristeillä usein tilanne oli niin, että eristeen suurin suhteellinen kosteus ei ollutkaan ulkokuoren ja eristeen rajapinnassa, vaan muutaman sentin päässä ulkokuoresta varsinkin laskennan alkuvaiheessa. Laskennan lopussa tämä tilanne oli useimmiten korjaantunut, kun rakennuskosteus oli suurimmaksi osaksi poistunut.

# LÄHTEET

- /1/ Vinha, Juha 2007. Rakennusfysiikka Luentomoniste kevät 2007, Tampereen Teknillinen Yliopisto
- /2/ Pentti, M., Hyyppöläinen, T. 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Julkaisu 94, Talonrakennustekniikka
- /3/ Lehtinen, T., Lehtonen H., Viljanen M., 1997. Betonisandwich-ulkoseinien kosteustekninen käyttäytyminen. Teknillinen Korkeakoulu, Talonrakennustekniikan Laboratorio, Julkaisu 70
- /4/ Metiäinen, P., Nieminen, J-P., 1984, Kosteuden vaikutus rakenteisiin, Rakentajain Kalenteri 1984, s.398-432; 456-473
- /5/ Straube, John 2002, Understanding and controlling air flow in building enclosures, Building Solutions Canada, Proc. Of 8<sup>th</sup> Bldg Sci. & Tech. Conf, Toronto, Feb. 22-23, 2001, pp. 282-302, <http://www.civil.uwaterloo.ca/BEG/Downloads/8thBSTC%20Air%20Flow%20Control.pdf>
- /6/ Björkholz, Dick, 1997, Lämpö ja kosteus, Rakennustieto Oy, Helsinki 1997
- /7/ Ojanen Tuomo, Kohonen Reijo, 1989, Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, VTT Tutkimuksia 590, Espoo
- /8/ Salonvaara Mikael, Nieminen Jyri, 2003, Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys, VTT Tiedotteita 2210, Espoo
- /9/ Künzeli, Hartwig, 1995, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components, Fraunhofer Institute of Building Physics
- /10/ Rakennusten lämmöneristys, Määräykset 2010, 2008, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C3
- /11/ Mills, A. F., 1999, Basic Heat & Mass Transder 2/E, Prentice Hall
- /12/ Hens, Hugo, 2007, Building Physics – Heat, Air and Moisture, Ernst & Sohn
- /13/ Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation, 2007, Standardi SFS-EN 15026, Suomen Standardisoimisliitto SFS
- /14/ Hagentoft, Carl-Eric, 2001, Introduction to Building Physics, Studentlitteratur, Lund 2005
- /15/ WUFI Pro 4.2 Online Help
- /16/ Leino Tapio, Häkkä-Rönnholm Eva, Nieminen Jyri, Koukkari Heli, Hieta Jouni, Vesikari Erkki, Törnqvist Jouko, 1998, Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu, VTT tiedotteita 1937, Espoo

## LIITE A – RAKENNETYYPPIEN PERIAATE



- 1 Ulkopinta sileä muottipinta, ei pinta käsittelyä
- 2 Betoninen ulkokuori 70 mm
- 3 Eriste mineraalivilla/EPS/PUR, ks. oheinen taulukko

Rakenne	Eriste	$\lambda$ (W/mK)	d (mm)	Uritus
US1	Villa	0.036	160	Kyllä
US2	EPS	0.036	160	Kyllä
US3	PUR	0.024	160	Ei
US4	PUR	0.024	240	Ei
US5a	EPS	0.031	180	Kyllä
US5b	EPS	0.031	180	Ei
US6	Villa	0.036	240	Kyllä
US7a	EPS	0.036	240	Kyllä
US7b	EPS	0.036	240	Ei
US8	Villa	0.036	350	Kyllä
US9	EPS	0.036	350	Ei

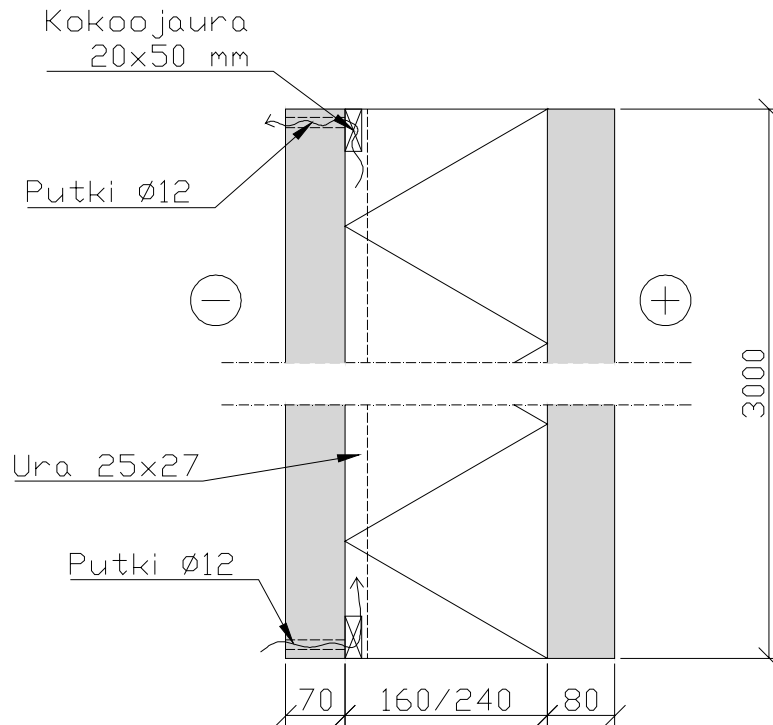
- 4 Betoninen sisäkuori 80 mm
- 5 Pintakäsittely ark. suunn. muk., vesihöyryä läpäisevä

Rakenteen U-arvo vaihtelee välillä 0,11...0,24 W/m<sup>2</sup>K. Ks. myös Taulukko 3.1, s.42.



## LIITE B – VIRTAUSLASKENNAN MALLINNUS

Tuuletusurituksessa syntyviä virtauksia laskettiin Comsol Multiphysics ohjelmalla, versio 3.5. Tässä liitteessä on esitetty tarkemmin laskentamallit 1..3 reunaehtoineen. Mallinnuksessa lämpöteknišenä sovelluksena oli General Heat Transfer ja virtausteknišenä sovelluksena Weakly Compressive Navier Stokes moduuli.



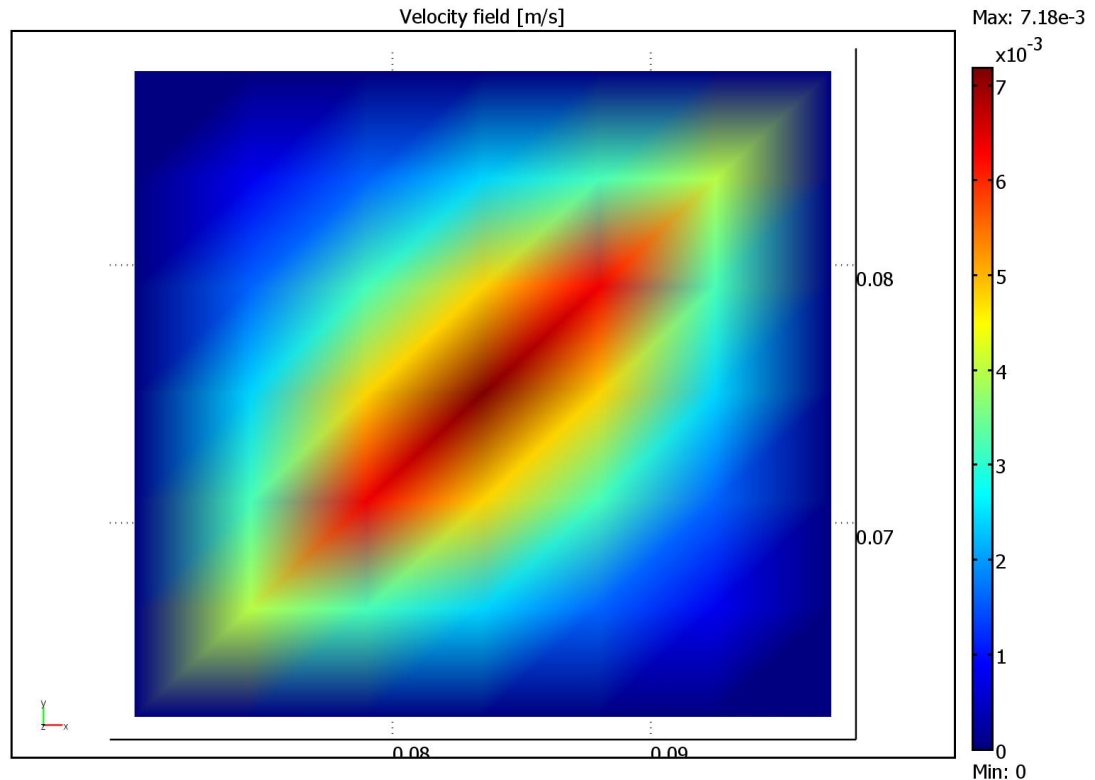
**B 1** Oheisessa kuvassa on esitetty virtauslaskennassa käytetyn mallin 1 periaate.

Kuvassa (B 1) on esitetty laskennassa käytetyn mallin 1 periaate kuva. Kokoojauran kokona käytettiin 20 x 50 mm ja sen rasteroiduilla pinnoilla oli reunaehtona virtaus- ja lämpölaskennassa symmetrisyys. Alareunassa putken päässä (halk. 12 mm) reunaehto oli 'open boundary, normal stress = 0 Pa'. Yläreunassa vastaavasti putkenpäässä reunaehtona oli 'outlet, normal stress = 0 Pa.' Virtauskanavan reunoilla käytettiin 'Wall, No Slip' reunaehtoa. Lämmönsiirtoa mallinnettaessa ulko- ja sisäpinnassa reunaehtona oli 'heat flux', jossa annettiin sisä- (+21°C) ja ulkolämpötila (vaihteli) sekä lämmönsiirtokerroin (sisällä 17 W/m<sup>2</sup>K, ulkona 8 W/m<sup>2</sup>K). Tuuletusputkille reunaehtoina oli yläreunassa 'convective flux' ja alareunassa annettiin putkeen suulle lämpötilaksi ulkolämpötila. Malli oli 150 mm leveä, rakennetyypin paksuinen ja 3 m korkea.

Materiaalitietoina käytettiin samoja kuin WUFI:ssa, mutta ilmaa mallinnettaessa käytettiin Comsol-ohjelman materiaalikirjastosta löytyvää ilmaa, jonka lämpö ja virtaus ominaisuudet on määriteltä paineesta ja lämpötilasta riippuviksi. Ilmalle nosteen laskemista varten määriteltiin referenssiarvo, joka laskettiin materiaalikirjaston avulla käyttämällä lämpötilana ulkoilman lämpötilaa ja paineena normaalia ilman painetta.

Varsinaiset luvussa 3 ilmoitetut virtausnopeuden arvot saatiin lisäämällä virtauskanavaan metrin ja kahden metrin korkeudelle pinnat, joiden läpi menevä virtaus

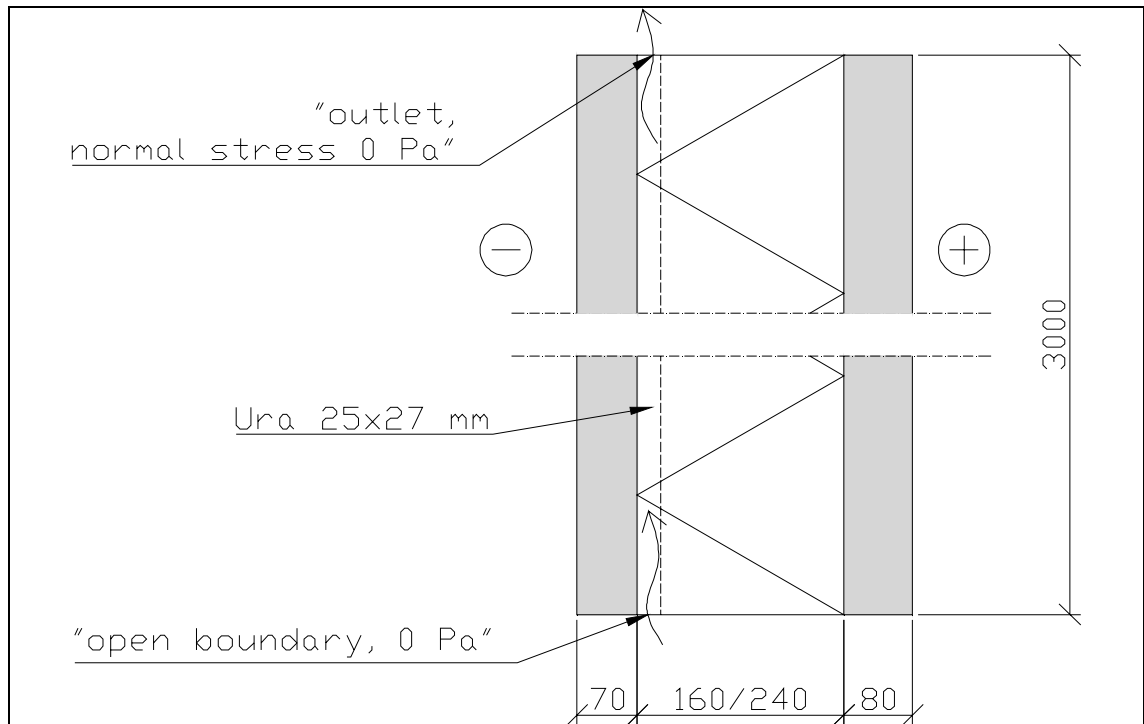
integroitiin ohjelmalla. Virtausnopeutena ilmoitettiin näiden kahden virtausnopeuden keskiarvo. Virtausnopeus pintojen läpi laskettiin ohjelman 'boundary integration' toiminnon avulla, jossa integroitavana suurena kanavan poikkipinnan yli oli 'Velocity field, U\_chns.'. Tämän integraalin tulos jaettiin uran pinta-alalla, jolloin saatiin keskimääräinen virtausnopeus poikkileikkauksessa. Oheisessa kuvassa (B 2) on esitetty virtauksen todellista jakaumaa urassa.



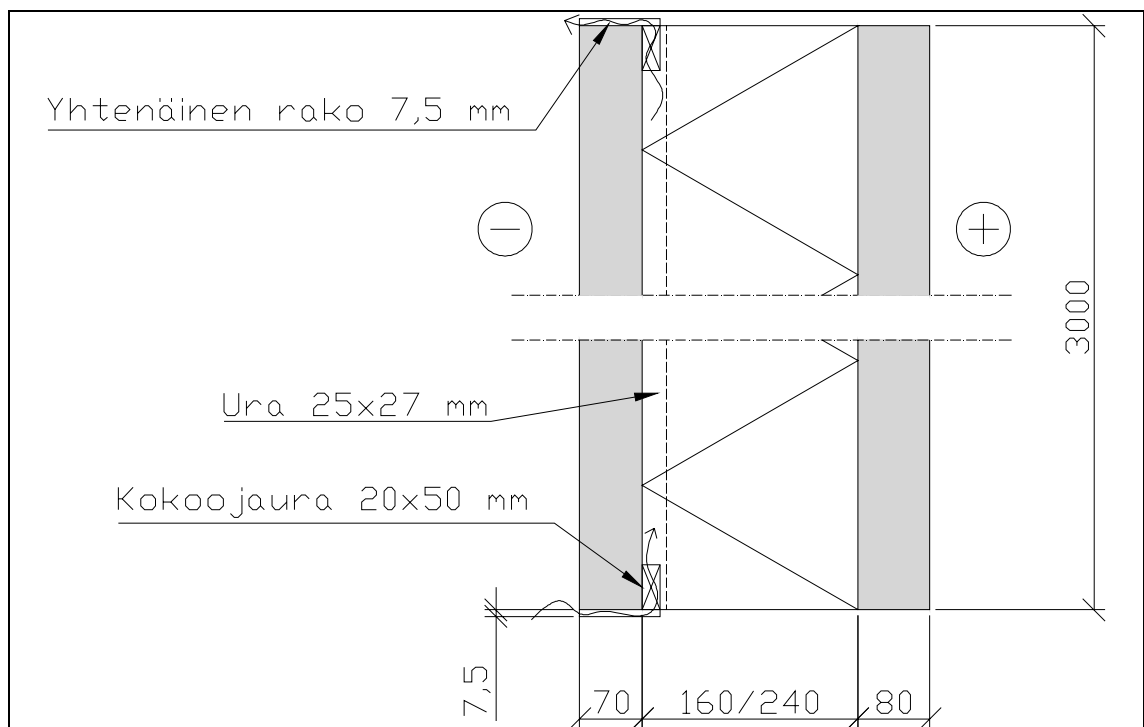
**B 2** Kuvassa on esitetty tarkempi uran poikkileikkauksessa vallitseva virtausnopeus metrin korkeudella elementin alareunasta tapaukselle US6 mallilla 1, kun ulkolämpötila oli  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Mallin 2 rakenteen alareuna on esitetty kuvassa (B 3). Mallissa 2 ilma virtasi suoraan tuuletuskanavaan ja siitä pois. Lämpötilalaskennassa alareunassa sisääntuloon asetettiin ulkolämpötila ja yläreunaan 'convective flux.' Virtauslaskennassa reunaehdot olivat kuten mallissa 1, eli alareunassa 'open boundary, normal stress = 0 Pa' ja yläreunassa 'outlet, normal stress = 0 Pa.'

Vastaavasti mallin 3 periaate on esitetty kuvassa B 4. Mallissa ilma tulee kokoojauraan 7,5 mm korkean yhtenäisen raon kautta ja poistuu samanlaisen raon kautta. Reunaehdot sisääntulossa ja ulostulossa olivat samanlaiset kuin malleissa 1 ja 2. Kokoojaurien päissä oli symmetria reunaehdot mallin reunoilla.



**B 3** Kuvassa on esitetty mallin 2 periaate rakennetyypille US1 ja US6.



**B 4** Kuvassa on esitetty mallin 3 periaate rakennetyypeillä US1 ja US6.

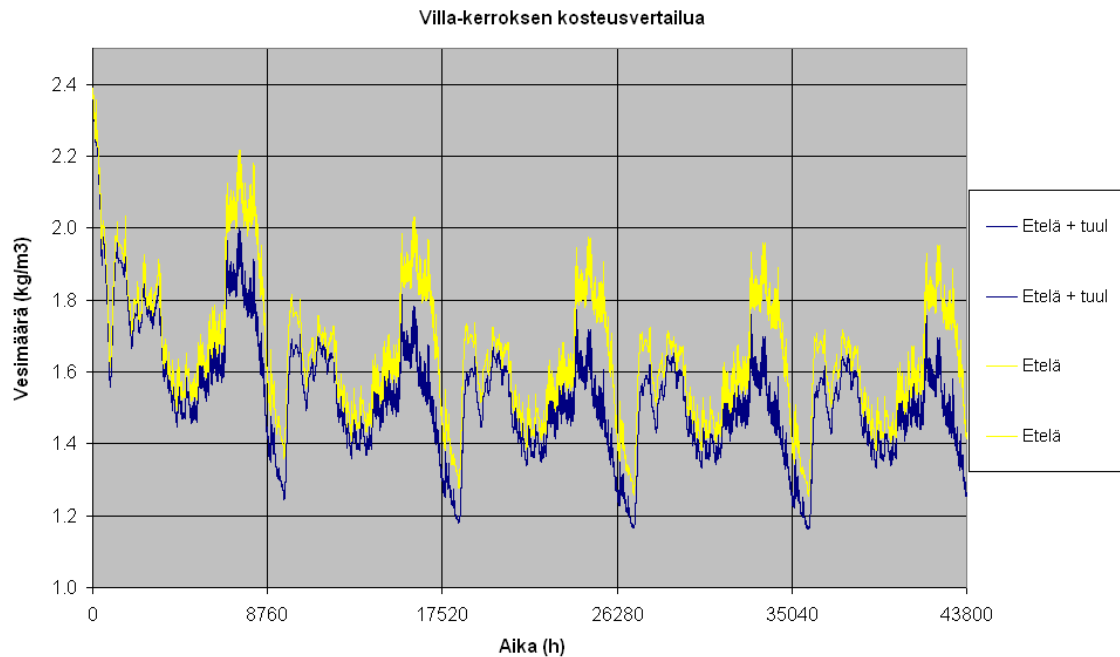
Ratkaisijana käytettiin stationary segregated solveria, joka antaa mahdollisuuden käyttää erilaista ratkaisijaa sekä asetuksia. Lämpötekkinen ongelma oli hyvin konvergoituva, joten sen oletusratkaisija asetuksiin ei ollut tarvetta koskea. Oletusratkaisijaksi Comsol asetti osaan malleista GMRES-ratkaisijan ja osaan

BICGSTAB-ratkaisijan. Virtauslaskennassa ratkaisijaksi valittiin PARDISO ja sen toleranssia toisinaan kasvettiin 0,1 % yhteen prosenttiin tulosten saamiseksi kohtuullisessa ajassa. Esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa -15 astetta, oli ratkaisun saaminen toisinaan työlästä, johtuen todennäköisesti siitä, että tällöin tuli paikallisesti niin suuria virtausnopeuksia (turbulenttisia virtauskohtia), jotka aiheuttivat ratkaisijalle ongelmia tarkan ratkaisun saamiseksi. Myös tiheämmän elementtiverkon käyttäminen olisi saattanut auttaa asiaan.

## LIITE C – TUULETUKSEN ARVIOINTIA RAKENNETYYPILLE US6

Rakennetyypille US6 tehtiin WUFI:lla vertailu laskenta, jolla yritettiin arvioida tuuletuksen vaikutusta rakenteen kosteuspitoisuuteen laskennan eri hetkillä. Tilanne mallinnettiin WUFI:lla siten, että eristeen ja ulkokuoren rajapintaan laitettiin eristeen puolelle yhden elementin levyinen negatiivinen kosteuslähde. Kosteuslähteen suuruus saatiin US6 tuuletuslaskelmista eri ajanhetkillä poistuvan kosteuden keskiarvona, eli  $1,75 \cdot 10^{-8} \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ , kun virtaus nopeus urassa oli 0,01 m/s. Koska tuuletus nimenomaan poistaa kosteutta rakenteesta, annettiin se miinusmerkkisenä.

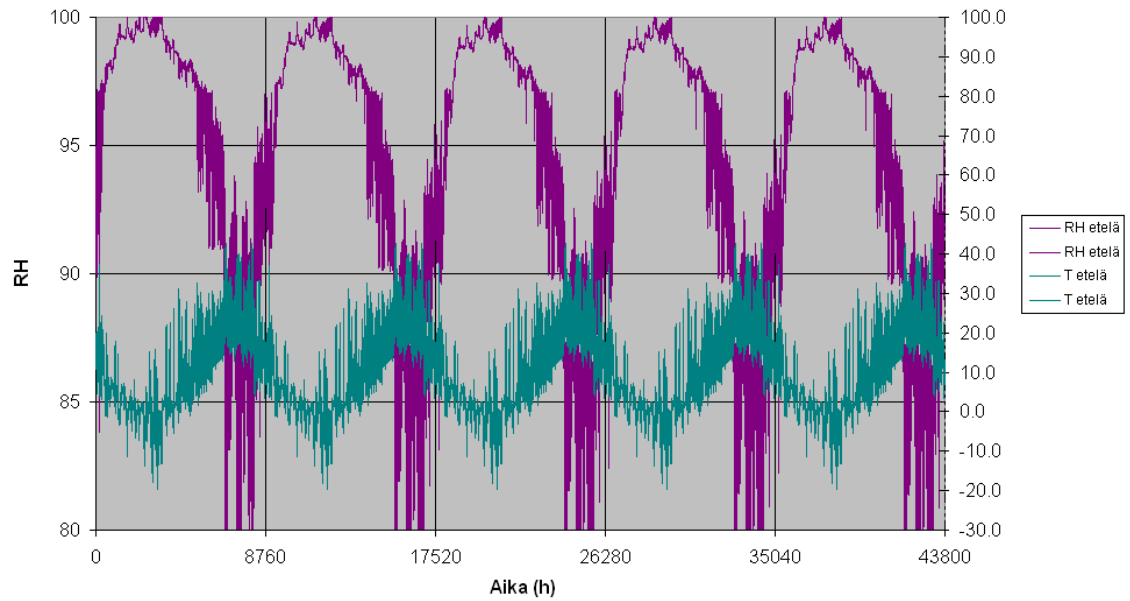
Oheisessa kuvassa (C 1) on esitetty US6:n eristetilän keskimääräistä kosteuspitoisuutta tuuletettuna ja tuulettamattomana. Kuvasta nähdään, että tuuletuksella saadaan eristekerroksen maksimi kosteus pysymään noin  $200 \text{ g/m}^3$  kuivempana, kuin ilman. Muutenkin tuuletettuna eristekerros pysyy kuivempana, kuin ilman, mutta suurin vaikutus on maksimikosteuden pienentämisessä.



**C 1** Kuvassa on esitetty eristetilän keskimääräinen kosteus rakennetyypille US6 Espoon eteläjulkisivulla sekä tuuletettuna että ilman tuuletusta. Laskennan alkuhetki oli 1.10.2009.

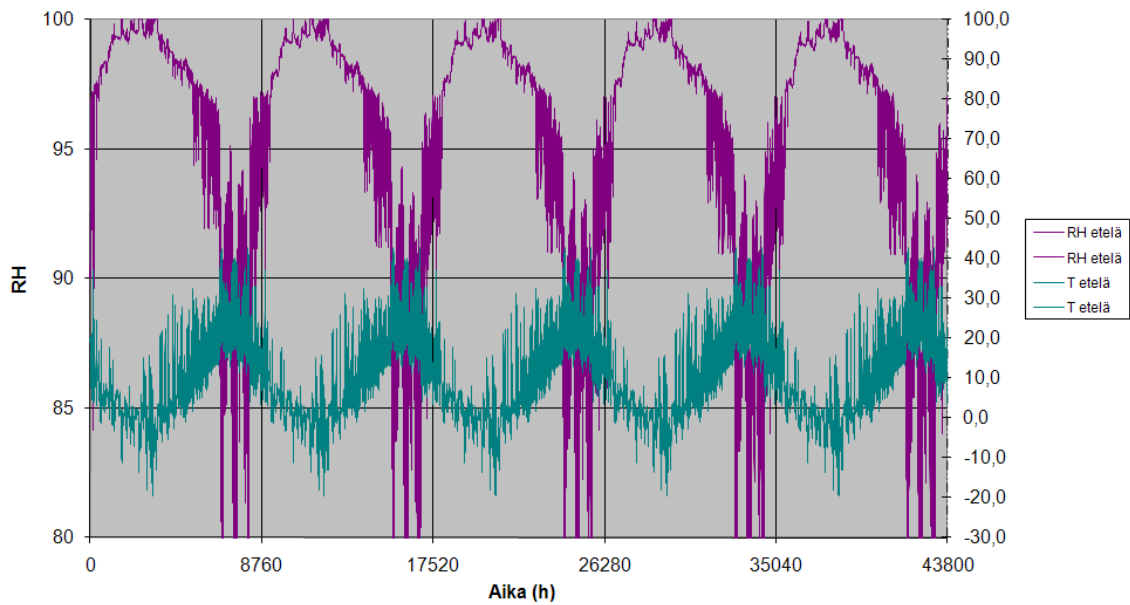
Suhteelliseen kosteuteen pisteessä P2 (C 2) tuuletuksella ei ollut radikaalia vaikutusta. Sekä tuuletettuna että tuulettamattomana suhteellinen kosteus kipusi 100 % tienoille. WUFI:lla tehdyn arvion mukaan tuuletuksella kuitenkin suhteellinen kosteus pysytteli kesäaikaan hienoisesti alempana kuin ilman tuuletusta. Samoin juuri ennen suhteellisen kosteuden nousua maksimiinsa, on havaittavissa hienoinen etu tuuletetun rakenteen hyväksi. Muuten suhteellisen kosteuden käyrät pisteessä P2 noudattelevat aika hyvin toisiaan. Ulkokuoren keskimääräisiin kosteuksiin tuuletuksella ei tutkimuksessa eteläjulkisivun tapauksessa havaittu olevan vaikutusta.

Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla



**C 2** Kuvassa esitetty suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaihtelua Espoon eteläjulkisivulla rakennetyypille US6 arvioidun tuuletuksen kera.

Ulkokuoren sisäpinnan RH ja lämpötila eteläisellä julkisivulla



**C 3** Kuva 3.43 on esitetty tässä vertailuja helpottamaan (US6 eteläjulkisivun suhteellinen kosteus ja lämpötila ilman tuuletusta).